



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus Presidente Prudente

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

EDICO RAMON DE MELO

**ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, COM USO DE IMAGENS
ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS, PARA
PRODUÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS
NÁUTICOS**

PRESIDENTE PRUDENTE

2024

EDICO RAMON DE MELO

**ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, COM USO DE IMAGENS
ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS, PARA
PRODUÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS
NÁUTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Cartográfica, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.
Orientador: Prof. Dr. Mauricio Galo

PRESIDENTE PRUDENTE

2024

M528e

Melo, Edico Ramon de

Estimação da linha de costa, com uso de imagens orbitais e dados maregráficos, para produção/atualização de produtos cartográficos náuticos / Edico Ramon de Melo. -- Presidente Prudente, 2024

71 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Mauricio Galo

1. Extração de linha de costa. 2. Modelo de estimação de linha de costa. 3. Análise de curto prazo. I. Título.

Impacto¹ Esperado Desta Pesquisa

Esta dissertação de mestrado propõe um método para estimar a linha de costa (LC) associada ao nível médio das preamares de sizígia (MHWS) e atualizar cartas náuticas. O método usa imagens ópticas orbitais e dados de marés, permitindo a estimativa das LC em regiões com grande amplitude de maré e praias de baixa declividade, em análises de curto prazo.

Potential Impact of This Research

This master's thesis proposes a method for estimating the coastline associated with Mean High Water Springs (MHWS) to update nautical charts. The method utilizes orbital optical images and tide data to estimate the coastline in regions with high tidal range and low-gradient beaches through short-term analysis.

¹Informação inserida de acordo com a Portaria nº 117, de 21 de dezembro de 2022, da Unesp.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

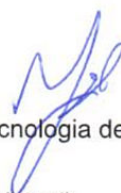
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, COM USO DE IMAGENS ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS, PARA PRODUÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS NÁUTICOS

AUTOR: EDICO RAMON DE MELO

ORIENTADOR: MAURICIO GALO

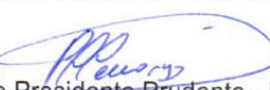
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAURICIO GALO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "M. Galo", is placed over the name of Prof. Dr. Mauricio Galo.

Prof. Dr. RODRIGO MIKOSZ GONÇALVES (Participação Virtual)
Departamento Engenharia Cartográfica e de Agrimensura / Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "P. Camargo", is placed over the name of Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo.

Presidente Prudente, 22 de janeiro de 2024

À minha mãe Rita.

Agradecimentos

À Marinha do Brasil, em especial ao CC Nascimento e CF Peçanha, pelo apoio e incentivo ao pleito e pelo apoio financeiro e logístico sem o qual não seria possível este trabalho.

Ao professor Dr. Mauricio Galo, cuja admiração nasceu na graduação e já ultrapassou uma dezena de anos, com paciência e dedicação me orientou fazendo sugestões de grande importância que culminou neste texto final.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves e Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo, com sugestões dadas no Exame de Qualificação que mudaram minha forma de enxergar os problemas aqui discutidos.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Unesp, em especial, ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e aos professores Dr. Aluir Porfirio Dal Poz e Dr. Daniel Arana (UFPR) por suas preciosas contribuições nos estudos dirigidos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos amigos do PPGCC em especial ao doutorando Vinícius, que com sua amizade deixou minha estadia em Presidente Prudente mais leve e interessante.

Aos amigos de longa data Adilson, Karina e Kelly que residem em Presidente Prudente há anos e puderam me ajudar seja com longas conversas sobre assuntos aleatórios, visitas, partidas de vôlei amador e passeios. Também, aos amigos que fiz na cidade: Mayara, Isabela, Alexandre, Jacqueline, Flávia e mais uma dúzia que não citarei mas estão na minha lembrança.

À minha família em especial ao meu pai Erivaldo, meus irmãos Uilams e Deise (grávida de Irís), meu sobrinho Igor, e à minha mãe Rita a quem dedico este trabalho, pois só ela sabe o que já passamos nessa vida e fica cada vez mais claro a importância das decisões que ela tomou por minha causa.

*"A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado. A
imaginação envolve o mundo."*

Albert Einstein

Resumo

O Brasil possui linhas de costa que somam 10.959 km de extensão. A DHN é o serviço hidrográfico nacional responsável por analisar e representar a linha de costa (LC) nas cartas náuticas brasileiras. Esta LC é um fenômeno dinâmico cujo estudo é do interesse de diversos profissionais do ramo das ciências da Terra, sendo a representação desta LC nas cartas náuticas brasileiras, referida ao indicativo vertical *Mean High Water Springs* (MHWS). O modelo para estimação da linha de preamar de sizígia (LPS), relacionada com o MHWS, se baseia na relação geométrica entre a altura da maré local e sua projeção horizontal vista do espaço e registrada em imagens de satélites, aqui denominado modelo de Projeção de Maré (PM). Assim, implementou-se a técnica para a extração das linhas de costa instantâneas (LCI) que é executada a partir do *software* QGIS. Além disso, desenvolveu-se o ANALICOS (ANÁLise de LInha de COsta), um *script* destinado à preparação dos dados, estimação e análise estatística, a linguagem de programação utilizada foi *Python*. A partir dos dados de entrada, foi possível verificar a coerência geométrica entre as distâncias horizontais medidas nas imagens Sentinel-2 com a altura de maré local. Foram, utilizadas duas linhas de referência: a marca deixada pela água em uma imagem Sentinel tomada no período da maré de sizígia e a linha de costa publicada pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) referida à linha de preamar média. Como resultado, a LPS estimada pelo modelo PM se aproximou mais da linha de referência extraída da imagem Sentinel. O produto foi validado para uso em cartas náuticas com escala a partir de 1:25.000 (Classe D), através de uma análise pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC-PCD) brasileiro vigente e analisado quanto aos critérios da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) cujo valor máximo tolerável para a incerteza horizontal para levantamento da linha de costa natural é de 20m a 95% de nível de confiança.

Palavras-chave: Extração de linha de costa, Modelo de estimação de linha de costa, Análise de curto prazo.

Abstract

Brazil has coastlines that are 10,959 km long. DHN is the national hydrographic service responsible for analyzing and representing the coastline (LC) in Brazilian nautical charts. This LC is a dynamic phenomenon whose study is of interest to several professionals in the field of Earth sciences, and the representation of this LC in Brazilian nautical charts is referred to the vertical indicative *Mean High Water Springs* (MHWS). The model for estimating the High Water Springs Line (LPS), related to MHWS, is based on the geometric relationship between the local tide height and its horizontal projection seen from space and recorded in satellite images, here called Tidal Projection (PM) model. Thus, we implemented the technique for the extraction of instantaneous coastlines (LCI) that is executed from QGIS *software* and developed the ANALICOS (coast line analysis), a *script* designed for data preparation, estimation and statistical analysis, implemented by the author in the *Python* programming language. From the input data, it was possible to verify the geometric coherence between the horizontal distances measured in the Sentinel-2 images with the local tidal height. Two reference lines were used: the mark left by the water in a Sentinel image taken in the period of the sizigy tide and the coastline published by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) referred to the average high water line. As a result, the LPS estimated by the PM model was closer to the reference line extracted from the Sentinel image. Finally, the product was validated for use in nautical charts with scale from 1:25,000 (Class D), through an analysis by the Brazilian Cartographic Accuracy Standard (PEC-PCD) and analyzed under the criteria of the International Hydrographic Organization (IHO).

Keywords: Shoreline extraction, Coast line estimation model, Short-term analysis.

Lista de figuras

Figura 1 – Trecho da carta náutica brasileira nº 1.	17
Figura 2 – Taxa de mudança da linha de costa a nível global em metros por ano, A dimensão do tamanho do círculo no mapa indica a intensidade da mudança e as cores verde e vermelho indicam acreção e erosão, respectivamente.	21
Figura 3 – Escala de tempo de alguns fenômenos observáveis na linha de costa.	22
Figura 4 – Distribuição da amplitude de maré em algumas regiões do mundo nas últimas décadas e aspecto dos gráficos da altura de maré em alguns locais para um mês de outubro qualquer. (A) Baía de <i>Fundy</i> no Canadá, (B) Enseada <i>Cook</i> nos EUA, (C) Baía <i>Bristol</i> na Inglaterra, (D) Baía <i>Mont-St-Michel</i> na França, (E) São Luís no Brasil, (F) Santa Cruz na Patagônia, (G) Mar Amarelo na China, e (H) <i>Derby</i> na Austrália.	23
Figura 5 – Perfil de praia, mostrando a nomenclatura geomorfológica.	24
Figura 6 – Ilustração das LCI para três épocas, vistas a partir do zênite.	25
Figura 7 – Ilustração vista em perfil do indicativo vertical associado à linha de costa.	25
Figura 8 – Levantamento fotogramétrico coordenado com o regime de maré.	27
Figura 9 – Exemplo do recorte de imagem orbital limitado à AOI em uma região costeira. Trata-se de uma composição falsa-cor de imagens do sensor MSI Sentinel-2.	28
Figura 10 – Processo de extração, generalização e suavização das LCI.	30
Figura 11 – Ilustração das LCI para três épocas com transectos e LB no mar.	31
Figura 12 – Ilustração da medição de três distâncias planas para LCIs observadas em três épocas.	31
Figura 13 – Geometria da força geradora de marés.	32
Figura 14 – Influência da força de tração e da força centrífuga sobre as massas d'água terrestres.	33
Figura 15 – Dinâmica luni-solar.	35
Figura 16 – Geometria da relação entre a altura da maré (vertical) e distâncias planas.	37
Figura 17 – Área de interesse - Praia do Futuro, Fortaleza - CE.	39
Figura 18 – Trecho da tábua de marés de Agosto de 2018, em que é destacado o horário e a altura da última preamar antes da tomada da imagem no dia 27.	41
Figura 19 – Imagem de referência tomada em 27/08/2018.	42
Figura 20 – Estação EMFOR que pertence à RMFG do IBGE.	44
Figura 21 – Alturas de maré registradas no dia 27/08/2018 e suas preamares, para a estação EMFOR.	44
Figura 22 – Linha de costa do litoral do Brasil disponibilizada pelo NOAA, publicada em 2017.	45
Figura 23 – Diagrama do método utilizado para extração das LCIs a partir de imagens orbitais.	47
Figura 24 – Início do arquivo .csv gerado no fim da etapa de medição das distâncias.	48
Figura 25 – Diagrama do método utilizado para a estimativa da LPS.	50

Figura 26 – Ilustração da relação geométrica entre a distância horizontal e a altura de maré por transecto.	51
Figura 27 – Disposição dos transectos arbitrados na Praia do Futuro, Fortaleza-CE.	55
Figura 28 – Ilustração dos produtos intermediários da etapa de extração das distâncias nas imagens orbitais, realizado no QGIS.	56
Figura 29 – Representação das distâncias medidas em cores quentes (valor alto) e frias (valor baixo).	57
Figura 30 – Distâncias medidas representadas em forma gráfica (a) e altura de maré observada no instante de cada imagem (b).	58
Figura 31 – Representação da correlação das amostras, positiva (vermelha) e negativa (azul).	59
Figura 32 – Gráfico das declividades (ordenadas) em percentual por transecto (abscissas).	60
Figura 33 – Gráfico dos erros na estimativa da LPS para cada transecto, em azul consideram-se os erros em relação à LPS visível em uma imagem do Sentinel e em laranja consideram-se os erros em relação à linha de costa da NOAA.	61
Figura 34 – Histograma dos erros em relação às duas referências.	62
Figura 35 – Comparação visual entre a LPS estimada e as duas linhas de referência.	63
Figura 36 – Trecho do Quadro 1 da ET-ADGV.	65

Lista de quadros

Quadro 1 – Variações horárias de elementos astronômicos notáveis.	34
Quadro 2 – Principais constituintes harmônicas puramente astronômicas.	35
Quadro 3 – Bandas espectrais MSI <i>Sentinel-2</i>	40
Quadro 4 – Data e hora exata da aquisição das imagens do Sentinel-2 utilizadas. . . .	41
Quadro 5 – Data e hora das observações de maré.	43
Quadro 6 – Configurações/Parâmetros utilizados na etapa de extração das distâncias. .	48
Quadro 7 – Elementos de entrada e saída do modelo PM.	53

Lista de abreviaturas e siglas

ANALICOS	ANÁLise de Linha de COSta (<i>script</i>)
AOI	<i>Area Of Interest</i>
CBERS	<i>China–Brazil Earth Resources Satellite program</i>
CC	Coeficiente de Correlação
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
EMFOR	Sigla da estação maregráfica de Fortaleza-CE
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSHHG	<i>Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
LB	Linha de base
LCI	Linha de costa instantânea
LC	Linha de costa
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LP	Linha de preamar
LPS	Linha de preamar de sizígia
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MHW	<i>Mean High Water</i>
MHWS	<i>Mean High Water Springs</i>
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i>

MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MNDWI	<i>Modified Normalized Difference Water Index</i>
MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
NIR	<i>Near InfraRed</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PM	Projeção de Maré
PPGCC	Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
RMPG	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RMSE	<i>Root Main Square Error</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
SWIR	<i>Short Wave InfraRed</i>
THU	<i>Total Horizontal Uncertainty</i>
WVS	<i>World Vector Shorelines</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Contextualização do problema	18
1.3	Objetivos	19
1.4	Potenciais contribuições científicas	19
2	FUNDAMENTAÇÃO	20
2.1	Características e mudanças da linha de costa	20
2.1.1	Fenômenos que afetam a LC e suas escalas de tempo	20
2.1.2	Amplitude de maré	22
2.1.3	Geomorfologia costeira	24
2.1.4	Indicativo vertical baseado no MHWS	24
2.2	Extração e medição da linha de costa	26
2.2.1	Fontes de informações para levantamentos da linha de costa instantânea	26
2.2.2	Extração da linha de costa instantânea em imagens orbitais	27
2.2.3	Medição da linha de costa instantânea ao longo do tempo	30
2.3	Fundamentos para o modelo de estimação da linha de preamar	32
2.3.1	Marés	32
2.3.2	Declividade do perfil de praia	36
3	MATERIAL	38
3.1	Área de Interesse	38
3.2	Imagens Orbitais	39
3.2.1	Critério para escolha da fonte da informação	39
3.2.2	Critério para escolha do período	40
3.2.3	Critério para escolha da imagem para extrair uma das linha de referência	40
3.3	Dados de maré	43
3.3.1	Alturas de maré utilizadas no cálculo da declividade	43
3.3.2	Altura de maré da Linha de Preamar de Sizígia	44
3.4	Linha de costa da NOAA utilizada como referência	45
4	MÉTODO	46
4.1	Extração e medição das linhas de costa instantâneas em imagens orbitais	46
4.2	Estimação da linha de preamar de sizígia (LPS)	49
4.2.1	Estimação pela projeção da maré (PM)	51

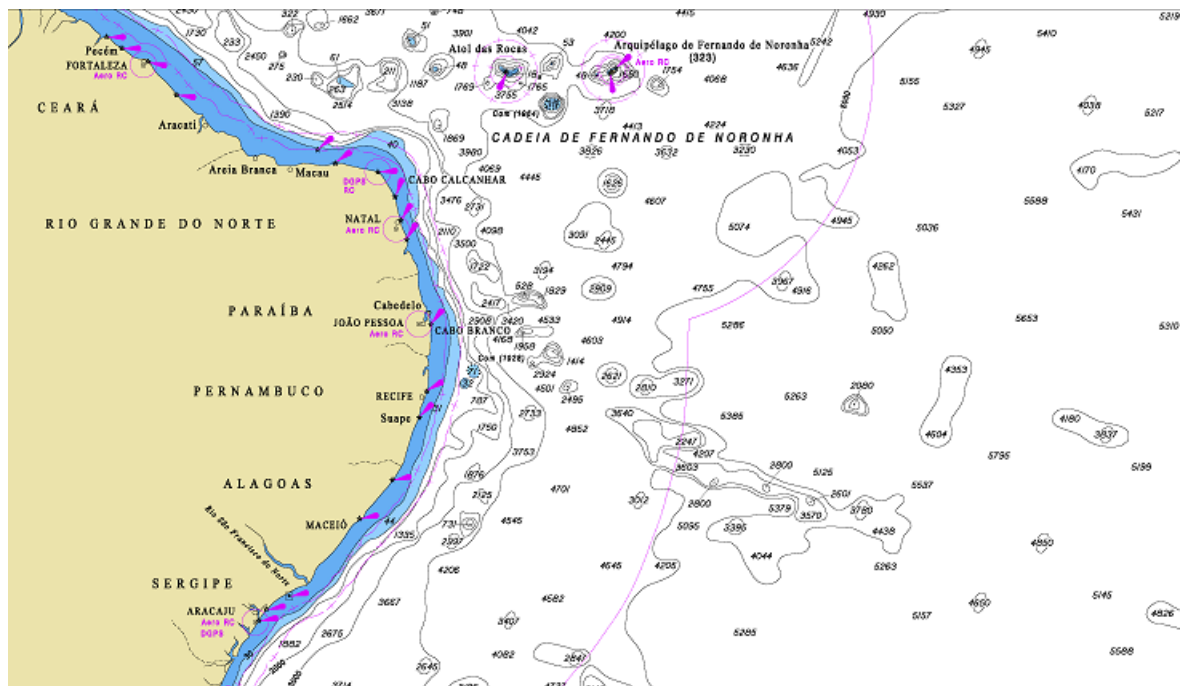
4.3	Análise dos resultados	53
4.3.1	Análise dos erros	53
4.3.2	Análise visual	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Análise das medições	57
5.2	Análise das declividades	59
5.3	Análise gráfica e estatística dos erros	60
5.4	Análise visual	63
5.5	Validação do produto para cartografia náutica	64
5.6	Síntese dos resultados e análise crítica	65
6	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS	69

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O Brasil possui linhas de costa que somam 10.959 km de extensão, de acordo com o Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil (IBGE, 2011). A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) representa o serviço hidrográfico nacional e possui como organização militar técnica o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) que tem como missão a análise, armazenamento e intercâmbio de dados geoespaciais marinhos, entre estes, todas as cartas náuticas brasileiras. A Figura 1 mostra o trecho de uma carta náutica nacional.

Figura 1 – Trecho da carta náutica brasileira nº 1.



Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2017.

Neste contexto, a linha de costa é um dos elementos da carta náutica que representa o limite entre a terra e a água na época de sua produção/atualização.

De maneira geral, a análise da variação da linha de costa e tendência da dinâmica geomorfológica costeira é fundamental para uma ampla gama de investigações realizadas por cientistas, engenheiros e gestores costeiros (BOAK; TURNER, 2005; ALTINUC; KEÇELI; SEZER, 2014).

Entretanto, o desafio de cada profissional é selecionar as fontes de dados, escala de tempo e modelos, de acordo com as características dos fenômenos que se deseja observar na linha de costa (VOS et al., 2019).

Estes fenômenos podem ser classificados de acordo com a escala de tempo em que ocorrem, sendo os de curto e médio prazo associados com meteorologia, acreção e erosão de sedimentos; e os de longo prazo associados com o aumento do nível do mar (SCARDINO et al., 2020), por exemplo.

1.2 Contextualização do problema

A Organização Hidrográfica Internacional (OHI) define os padrões para os levantamentos hidrográficos, incluindo a linha de costa (OHI, 2020). Apesar de suas normas não especificarem um *datum* vertical utilizado como referência a nível global, nas cartas náuticas brasileiras, a linha de costa está associada ao nível médio da maré de preamar de sizígia¹, referida ao indicativo vertical *Mean High Water Springs* (MHWS) (DHN, 2022). Estas referências verticais estão associadas ao estudo da dinâmica de maré oceânica (FRANCO, 2009), cujas características são próprias de cada região costeira, como discutido brevemente no Capítulo 2.

Como especificado pela OHI, os valores de incerteza total horizontal (THU - *Total Horizontal Uncertainty*) aceitáveis para levantamentos da linha de costa estão entre 20 a 2 m, ao nível de 95% de confiança. Isto varia em função do rigor almejado para o levantamento, de acordo com sua finalidade (OHI, 2020). De maneira geral, essas regulamentações estabelecem critérios mais rigorosos para as construções costeiras próximas à linha do litoral, quando comparadas aos elementos naturais que a compõem.

Nas regiões em que há grande amplitude de maré² e baixa declividade do perfil de praia, é possível observar com maior intensidade a variação horizontal da linha de costa relacionada com a maré astronômica, originada de acordo com os movimentos astronômicos entre o sistema Terra-Lua-Sol, sendo que no Brasil ela se manifesta de forma mais intensa na região equatorial (FRANCO, 2009).

Contanto, por estas características, pode-se inferir que seria suficiente utilizar como indicativo (*proxy*) da MHWS a linha de preamar de sizígia (LPS) visível em uma imagem de satélite tomada no instante de maior altura da maré. Porém, raramente isto ocorre, uma vez que as imagens ópticas costumam ser tomadas nos instantes programados pelo sistema, que geralmente correspondem aos horários em que há maior incidência de luz solar, devido às suas características de sensores passivos, e não coordenado com o regime de maré local.

¹ Maior altura da maré semidiurna de maior amplitude em uma semilunação, ocorre aproximadamente a cada 15 dias (FRANCO, 2009).

² Em Pereira, Concejo e Trindade (2020) é denominada meso, macro ou hiper maré de acordo com o valor da amplitude em metros. Por outro lado, a baixa amplitude é denominada micro-maré.

Neste contexto, a análise da linha de costa por meio de imagens orbitais e sua associação com referenciais verticais apresentam-se como um desafio significativo. Essa abordagem é essencial para delimitar com precisão os limites entre a terra e a água nas cartas náuticas.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma estimativa da linha de costa e avaliar sua viabilidade para a produção e atualização de cartas náuticas, definindo um indicador associado ao nível médio de preamar de sizígia (MHWS). Para alcançar esse objetivo, propõe-se a utilização de imagens ópticas orbitais e dados maregráficos em regiões com grande amplitude de maré e perfil de praia com pequena declividade. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver e implementar um método para extração de linha de costa instantânea (LCI) a partir de medidas feitas sobre imagens ópticas orbitais;
- Desenvolver e implementar um modelo para estimar a linha de preamar de sizígia (LPS) a partir de imagens tomadas fora do instante da preamar de sizígia;
- Analisar estatisticamente os resultados obtidos com o modelo proposto; e
- Validar o produto para sua aplicação na produção ou atualização de cartografia náutica, seguindo os critérios estabelecidos pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI) e pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) brasileiro.

1.4 Potenciais contribuições científicas

A partir do estado da arte sobre o assunto ([KOMOLAFE et al., 2022](#); [MCALLISTER et al., 2022](#); [SOK et al., 2022](#); [NIJAMIR et al., 2023](#)), é possível afirmar que, a maioria deles tem como propósito central, ou faz referência, a análise de acresção e deposição de sedimentos ao longo de anos ou décadas. Neste sentido, percebe-se, no que é do nosso conhecimento, que são poucos os trabalhos cujo propósito central seja relacionar a linha de costa com *data* verticais, que envolvem os fenômenos relacionados com os ciclos de maré oceânica ([PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020](#)), como a preamar de sizígia.

Desse modo, este estudo pode oferecer contribuições para as pesquisas que investigam técnicas de extração de linha de costa instantânea. Por outro lado, o modelo proposto apresenta um potencial para análises de fenômenos de curto prazo em ambientes costeiros, uma vez que, seu foco não reside na avaliação da evolução das características físicas costeiras, mas sim na estimativa de um indicador para a linha de preamar durante o período observado.

2 Fundamentação

2.1 Características e mudanças da linha de costa

A linha de costa (LC) pode ser definida como um fenômeno dinâmico resultante da interseção entre as superfícies do terreno e da água ([BOAK; TURNER, 2005](#)) num determinado instante. Esta LC varia principalmente por causa da influência de fenômenos naturais que, devido às características geomorfológicas costeiras, afetam em diferentes escalas de tempo e espaço.

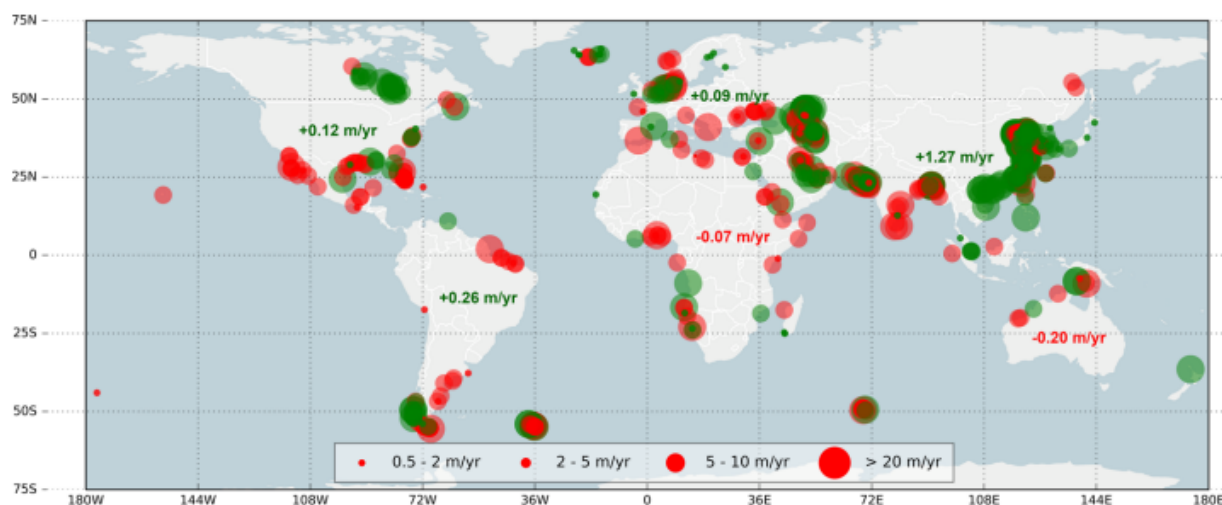
Na literatura sobre este assunto é possível verificar que os autores costumam caracterizar as regiões costeiras de acordo com diversos aspectos físicos e geomorfológicos, por exemplo: o tamanho do grão de areia, a declividade, o regime de marés, correntes, regime de ondas e climatologia local ([ZEINALI; DEGHANI; TALEBBEYDOKHTI, 2021](#)).

2.1.1 Fenômenos que afetam a LC e suas escalas de tempo

Além da maré, existem outros fenômenos com diferentes escalas de tempo que alteram a forma dos ambientes costeiros e por consequência a posição da linha de costa (LC). Assim, é comum a classificação destes fenômenos como de longo, médio e curto prazo para as escalas de milhares, centenas e dezenas de anos, respectivamente ([ALBUQUERQUE, 2008](#)).

Como exemplo de um fenômeno de médio a longo prazo tem-se a mudança da LC associada à acreção e/ou erosão de sedimentos oriundos de rios, bem como, o aumento no nível médio do mar ([SCARDINO et al., 2020](#)). Já para o curto prazo tem-se, por exemplo, a acreção e/ou erosão de sedimentos devido à rotação em praias de baías e fenômenos abruptos causados pela ação humana (construções e aterramentos) ou natural (tempestades e tsunamis) ([VOS et al., 2019](#)). A Figura 2 mostra a taxa de variação da linha de costa a nível global como base em [Mentaschi et al. \(2018\)](#). Nesta figura pode-se observar que, no Brasil, as maiores taxas de mudança ocorrem na região Norte, próximo à linha do Equador.

Figura 2 – Taxa de mudança da linha de costa a nível global em metros por ano, A dimensão do tamanho do círculo no mapa indica a intensidade da mudança e as cores verde e vermelho indicam acresção e erosão, respectivamente.



Fonte: [Luijendijk et al. \(2018\)](#)

Por isso, como constatado de forma recorrente na bibliografia sobre o assunto, o fenómeno de acresção e erosão de sedimentos é de grande interesse para profissionais que trabalham/estudam/pesquisam as linhas de costa ([BOAK; TURNER, 2005](#)), cuja análise costuma ser feita com a observação das linhas de costa instantâneas (LCI) extraídas na escala de tempo de anos e décadas e os resultados convertidos para taxa anual de mudança da LC ([CHANG; LAI, 2014](#)). A Figura 3 apresenta um quadro com a compilação de alguns fenómenos, que alteram a LC, presentes da bibliografia e suas respectivas escalas de tempo baseado em [Boak e Turner \(2005\)](#).

Figura 3 – Escala de tempo de alguns fenômenos observáveis na linha de costa.

Tipo de Fenômeno	Fenômeno\ Escala	Horas	Dias	Meses	Anos	Décadas	Séculos
Abrupto	Meteorológicos/ Tsunami/ Tempestade						
Abrupta/Constante	Atividade humana						
Cíclico/Constante	Acréscimo/ Erosão de sedimentos de rios						
Cíclico	Acréscimo/ Erosão em rotação de praias						
Constante	Aumento do nível do mar						
Cíclico	Efeito da maré diurna						
Cíclico	Efeito da maré quinzenal						
Cíclico	Efeitos nodais na maré						

Fonte: elaborado pelo autor baseado em [Boak e Turner \(2005\)](#).

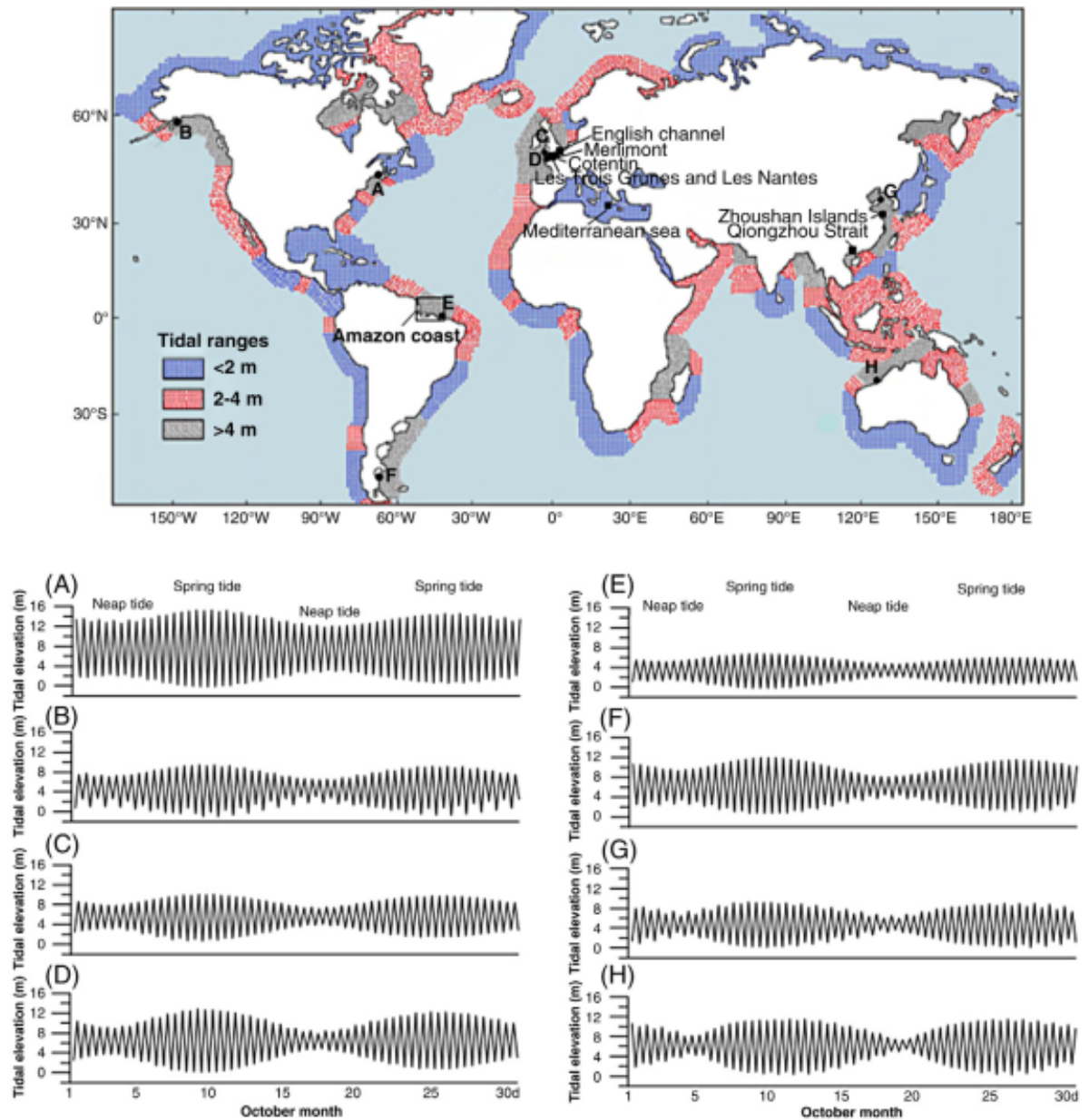
Assim, na escala da morfologia costeira, os ciclos de maré de quadratura e sizígia enquadram-se como fenômenos de curto prazo pois ocorrem em média duas vezes por mês ([KVALE, 2006](#)), ademais existem os fenômenos oceanográficos e meteorológicos que, por suas características aleatórias, não há consenso sobre como afetam de forma sistemática a linha de costa. Por esta razão, diversos estudos se dedicam a investigar modelos a fim de obter melhores resultados na estimativa e/ou previsão desta LC ([ZEINALI; DEGHANI; TALEBBEYDOKHTI, 2021](#)).

2.1.2 Amplitude de maré

A classificação de uma certa região de acordo com a amplitude de maré é utilizada para identificar as áreas que sofrem maior ou menor influência em função desta característica. A Figura 4 ilustra essa distribuição no mundo ([PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020](#)). Nesta figura as áreas em azul são classificadas em regime de micromaré (amplitude < 2m); as áreas em vermelho mesomaré (amplitude entre 2 e 4m); e as áreas em cinza macromaré (amplitude > 4m).

A Figura 4 também mostra o gráfico das altitudes de maré ao longo de um mês para algumas regiões do mundo. Estas regiões são representadas pelas letras de A a H, nota-se que foi destacada a região de São Luis - MA (E), que por estar próximo ao delta do rio Amazonas. Nesta região as amplitudes de maré são superiores a 4m, portanto, caracteriza-se como regime de macromaré.

Figura 4 – Distribuição da amplitude de maré em algumas regiões do mundo nas últimas décadas e aspecto dos gráficos da altura de maré em alguns locais para um mês de outubro qualquer. (A) Baía de *Fundy* no Canadá, (B) Enseada *Cook* nos EUA, (C) Baía *Bristol* na Inglaterra, (D) Baía *Mont-St-Michel* na França, (E) São Luís no Brasil, (F) Santa Cruz na Patagônia, (G) Mar Amarelo na China, e (H) *Derby* na Austrália.

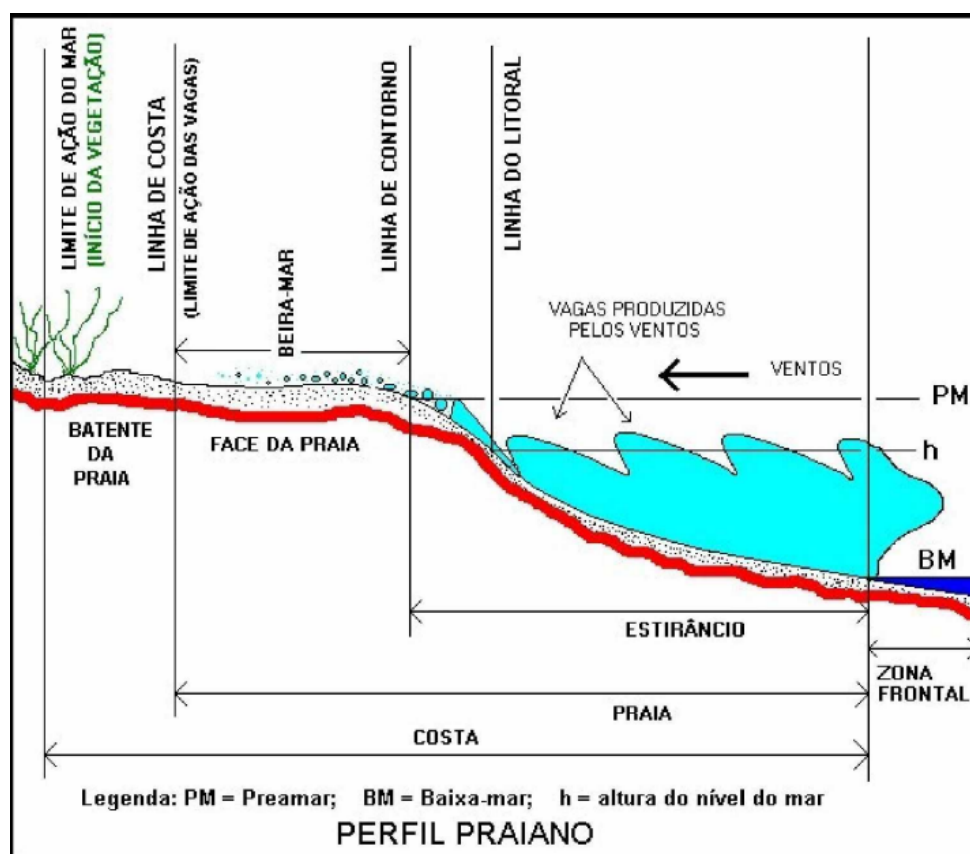


Fonte: [Pereira, Concejo e Trindade \(2020\)](#).

2.1.3 Geomorfologia costeira

Conhecer a geomorfologia costeira, em especial os ambientes de praia, é importante pois o perfil praial é um dos elementos que determina a posição das linhas de costa. Assim, com base na Figura 5, a feição de interesse para este trabalho é denominada geomorfologicamente como Linha de Contorno, definida como *"Limite até onde se estende a ação efetiva da maré. É um caso particular da linha do litoral, correspondente à situação de preamar"* por Lima (2002).

Figura 5 – Perfil de praia, mostrando a nomenclatura geomorfológica.

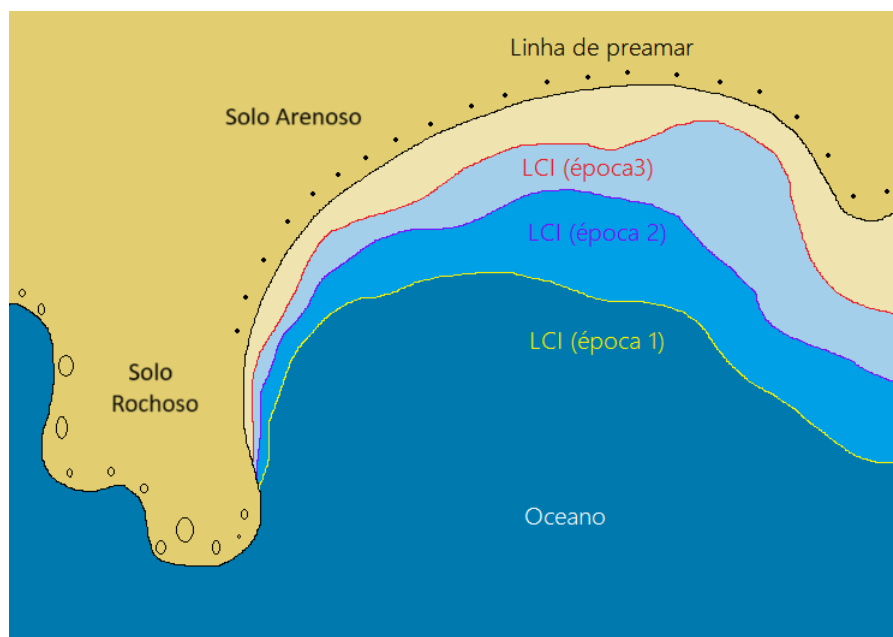


Fonte: Lima (2002).

2.1.4 Indicativo vertical baseado no MHWS

Devido à sua variação constante é necessário estabelecer um indicativo (*proxy*) para linha de costa (LC), sendo as características deste tipo de indicador estudado de forma abrangente em Boak e Turner (2005) e McAllister et al. (2022). Definir um indicador de LC é importante pois está associado com o limite entre a terra e a água que é observado ou levantado e a linha que se deseja avaliar. A Figura 6 ilustra linhas de costa instantâneas (LCI) hipotéticas para três épocas, vistas a partir do zênite.

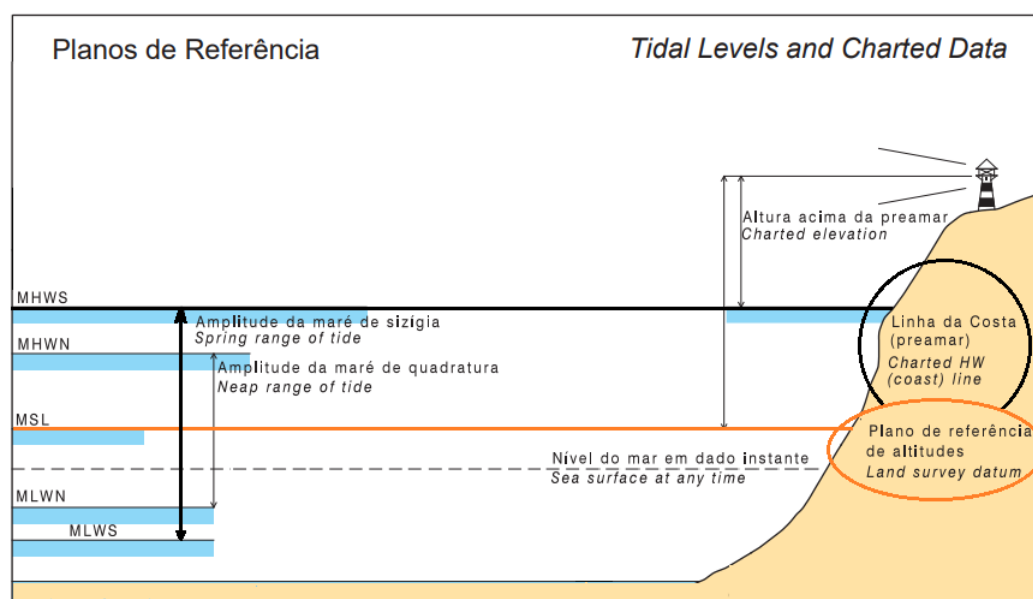
Figura 6 – Ilustração das LCI para três épocas, vistas a partir do zênite.



Fonte: elaborado pelo autor.

Neste contexto, como o objetivo deste trabalho é a determinação da linha associada ao indicativo vertical das cartas náuticas (IHO, 2019) este referencial, que é associado ao estudo da dinâmica de maré astronômica (FRANCO, 2009) é apresentado na Figura 7. Este referencial está relacionado com a interação gravitacional do sistema Terra, Lua e Sol, cujas constituintes harmônicas que descrevem esse fenômeno variam de acordo com a posição geográfica e, portanto, é característica de cada região costeira.

Figura 7 – Ilustração vista em perfil do indicativo vertical associado à linha de costa.



Fonte: Adaptado a partir de DHN (2022).

Assim, da Figura 7 extraída de [DHN \(2022\)](#) é possível verificar que a linha de costa das cartas náuticas brasileiras está relacionada com o nível médio da preamar de sizígia. Esta referência vertical é conhecida em inglês como MHWS (*Mean High Water Springs*)¹.

2.2 Extração e medição da linha de costa

2.2.1 Fontes de informações para levantamentos da linha de costa instantânea

Uma revisão sobre o tema publicada em 2005 ([BOAK; TURNER, 2005](#)) mostrou que, até então, a maioria das fontes de informações para a linha de costa instantânea (LCI) eram as fotografias aéreas cuja extração era feita via de regra de forma manual. Entretanto, neste mesmo trabalho foi possível verificar que alguns autores utilizavam dados de cartas, levantamentos topográficos, imagens de câmaras de vídeo, dados de levantamentos GNSS (*Global Navigation Satellite System*), imagens orbitais e dados LiDAR (*Light Detection And Ranging*).

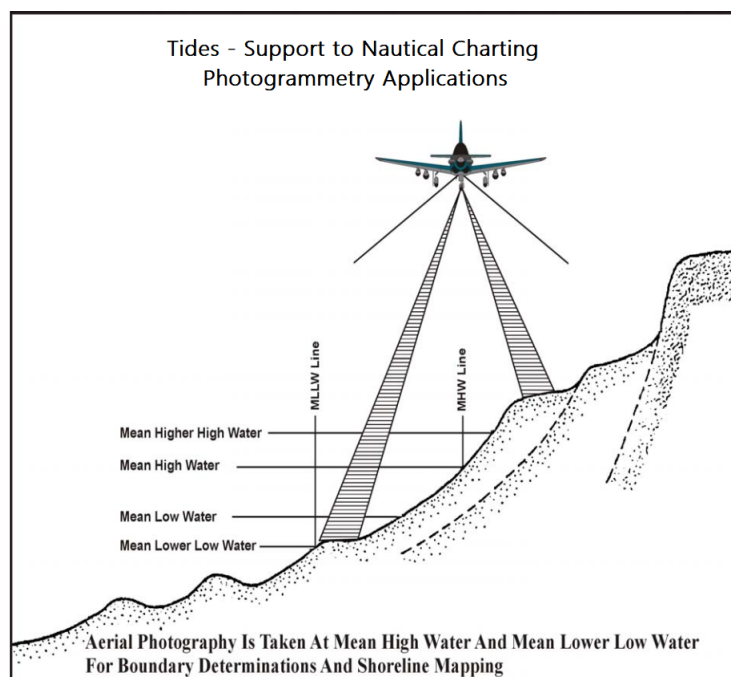
Neste contexto, como o objetivo deste trabalho é a estimativa da linha de preamar de sizígia, a escolha da fonte de informação é um fator relevante para atender a esta necessidade. Assim, algumas técnicas permitem a extração da linha de costa no instante da preamar de sizígia, como é o caso da topografia, do GNSS e da aerofotogrametria. Os dois primeiros possuem pouca cobertura espacial e o terceiro está sendo substituído aos poucos pelas imagens orbitais, que possuem a capacidade de cobrir grandes áreas, em detrimento da precisão, além de proporcionar um baixo custo para o usuário final.

Porém, há alguns trabalhos que testam o uso da videogrametria aérea ([SILVA, 2002](#)) e terrestre ([ARMAROLI et al., 2006](#)), que podem proporcionar uma alta resolução temporal, mas possui as mesmas limitações espaciais da fotogrametria. A Figura 8 mostra uma ilustração presente na publicação *Special Publication NOS CO-OPS 1* da NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration* ([GILL; SCHULTZ, 2001](#)) sobre como é feito o levantamento aerofotogramétrico coordenado com a dinâmica de maré, para obter a linha de preamar e baixa-mar. Tem-se também o levantamento LiDAR, que permite a extração da linha de preamar de sizígia através da intersecção do referencial vertical MHWS com o Modelo Digital do Terreno (MDT) gerado ([ROBERTSON et al., 2004](#)).

Por fim, tem-se as imagens satelitais oriundas de programas como Landsat, Sentinel e CBERS (*China–Brazil Earth Resources Satellite program*), com grande cobertura espacial, tempo de revisita de poucos dias e resolução espacial capaz de registrar as variações na linha de costa ([VOS et al., 2019](#)). No entanto, como a maioria das imagens orbitais não são tomadas no instante da preamar de sizígia, o desafio que permanece é a investigação sobre técnicas capazes de detectar e modelar os sinais presentes na variação da linha de costa (como a dinâmica das

¹ Mais detalhes sobre o significado de *Mean High Water Springs* pode ser encontrado em [Franco \(2009\)](#).

Figura 8 – Levantamento fotogramétrico coordenado com o regime de maré.



Fonte: Gill e Schultz (2001).

marés) na escala de tempo de curto prazo utilizando como fonte as imagens orbitais, seus metadados e dados externos como a altura da maré local.

Ademais, uma vez que a linha de costa é afetada por fenômenos atmosféricos e oceanográficos como, ventos, ondas, pressão, temperatura, regime pluvial, dinâmica fluvial (quando perto de deltas), deduz-se que este é um tema complexo e não se esgota apenas com a metodologia proposta neste trabalho.

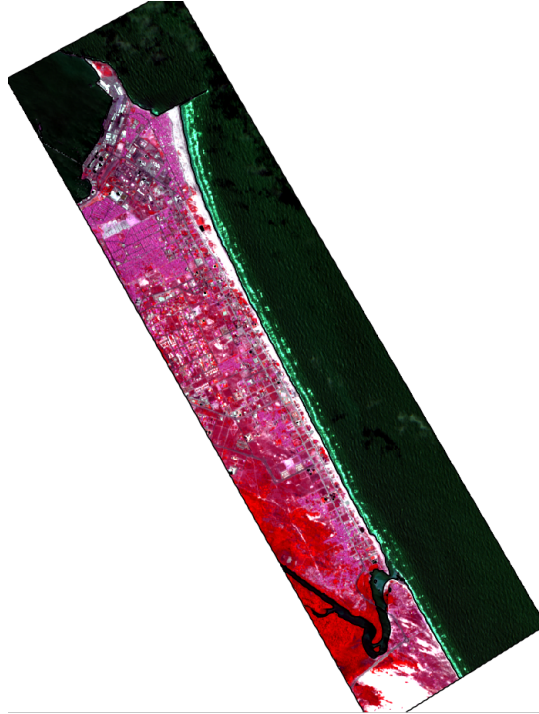
2.2.2 Extração da linha de costa instantânea em imagens orbitais

Até o início deste século prevaleceram as técnicas de extração manual da linha de costa (BOAK; TURNER, 2005). Com o desenvolvimento das técnicas de extração e análise de informações a partir de imagens digitais (GONZALEZ; WOODS, 2008; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008) diversos estudos apresentaram alternativas para a extração da linha de costa de forma automática (VOS et al., 2019; KUMAR; AFZAL; AFZAL, 2020).

Este tipo de técnica normalmente começa com o recorte da imagem para a área de interesse. Trata-se de um polígono por vezes denominado na literatura como AOI (*Area Of Interest*) ou ROI (*Region Of Interest*) (VOS et al., 2019), que ao limitar o processamento subsequente apenas à área de interesse confere menor consumo de recursos computacionais, maior agilidade na obtenção dos resultados e evita falsos-positivos durante a classificação dos pixels. A Figura 9 ilustra o recorte feito em uma composição falsa-cor de imagens orbitais obtidas para a região costeira de interesse deste trabalho, sendo que mais detalhes sobre a

localização serão dados no Capítulo 3.

Figura 9 – Exemplo do recorte de imagem orbital limitado à AOI em uma região costeira. Trata-se de uma composição falsa-cor de imagens do sensor MSI Sentinel-2.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na etapa de classificação separam-se os *pixels* que possuem informações sobre água e terreno a fim de estimar a linha de costa instantânea. Para tanto, é comum ver na literatura a aplicação de índices espectrais de água como NDWI (*Normalized Difference Water Index*) ou sua forma modificada o MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*). A diferença entre estes índices está na substituição da banda espectral do infravermelho próximo NIR (*Near Infra-Red*) pela do Infravermelho de ondas curtas SWIR (*Short-Wave Infra-Red*), esta mais eficiente para a detecção de corpos d'água (VOS et al., 2019). As Equações utilizadas para o cálculo do NDWI e do MNDWI são respectivamente 2.1 e 2.2 .

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (2.1)$$

$$MNDWI = \frac{G - SWIR}{G + SWIR} \quad (2.2)$$

em que, G : valor de reflectância na banda do espectro verde; NIR : valor de reflectância na banda do espectro infra-vermelho; e $SWIR$: valor de reflectância na banda do espectro infra-vermelho próximo.

Outro processamento muito comum na literatura que trata da extração da LCI é a classificação de imagens. Como exemplo, tem-se o algoritmo de K-médias que trabalha com o

princípio de *clustering* agrupando os *pixels* conforme sua similaridade estatística, de acordo com uma quantidade de classes pré definidas. Alguns trabalhos utilizam o algoritmo de Otsu que determina o limite que separa duas feições baseado na minimização da variância dos valores de pixel nela presente. Entretanto, um trabalho publicado em 2009 (LIU; YU, 2009) mostra que o algoritmo de K-médias permite resultados similares e com mais eficiência computacional.

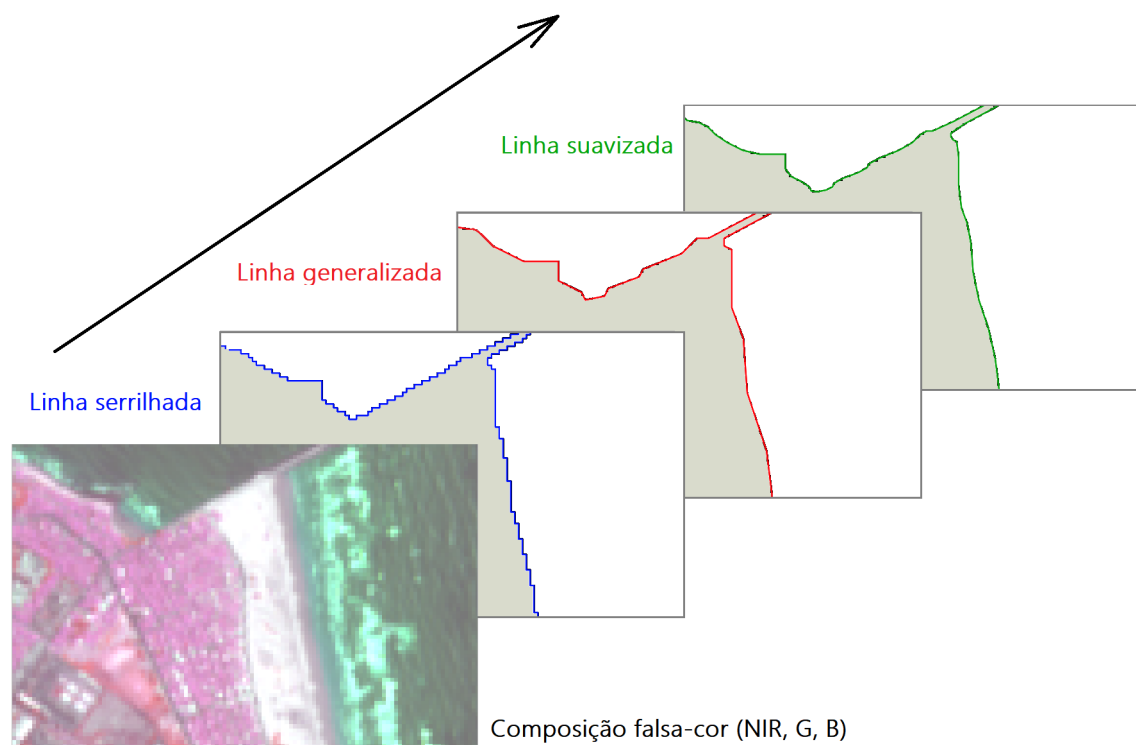
Ainda sobre a classificação de imagens, tem-se mais recentemente, o aumento de estudos sobre algoritmos que utilizam Redes Neurais Artificiais (RNA) multicamadas, chamado MLP (*Multi-Layer Perceptron*), baseado em princípios de aprendizagem de máquina (VOS et al., 2019). Entretanto, para algumas aplicações os métodos mais tradicionais são suficientes para atender aos objetivos.

Então, a partir de um produto *raster* binarizado (duas classes), oriundo de classificação dos *pixels* entre terra e água, pode-se vetorizá-lo seja de forma manual ou automaticamente. A depender da escala de visualização, as linhas obtidas apresentam um aspecto "serrilhado", pois representam as bordas dos *pixels* e para tanto pode-se realizar uma generalização que consiga reduzir a quantidade de vértices sem perder a forma da LCI, podendo-se obter resultado semelhante à uma interpretação visual sub-pixel.

Para tanto, existem diversos algoritmos de generalização de vetores (Douglas-Peucker, enésimo ponto, Opheim, etc.). Nove destes foram discutidos e testados em Shi e Cheung (2006) para algumas linhas de costa na China. Neste artigo os autores concluíram que o algoritmo de Douglas-Peucker foi o mais acurado dentre os testados. Esta rotina se baseia num valor de tolerância utilizado para encontrar os pontos de máxima distância perpendicular entre uma linha de base e os vértices da linha generalizada. Nesta etapa, a linha final é a versão da linha que contém todos os vértices originais, dentro da tolerância estabelecida.

Por fim, uma suavização pode ser aplicada para que a LCI possua uma forma mais natural, entretanto deve-se estabelecer um valor angular máximo para que feições anguladas como cais e enrocamentos não sejam deformadas neste processo. A Figura 10 ilustra este método.

Figura 10 – Processo de extração, generalização e suavização das LCI.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.3 Medição da linha de costa instantânea ao longo do tempo

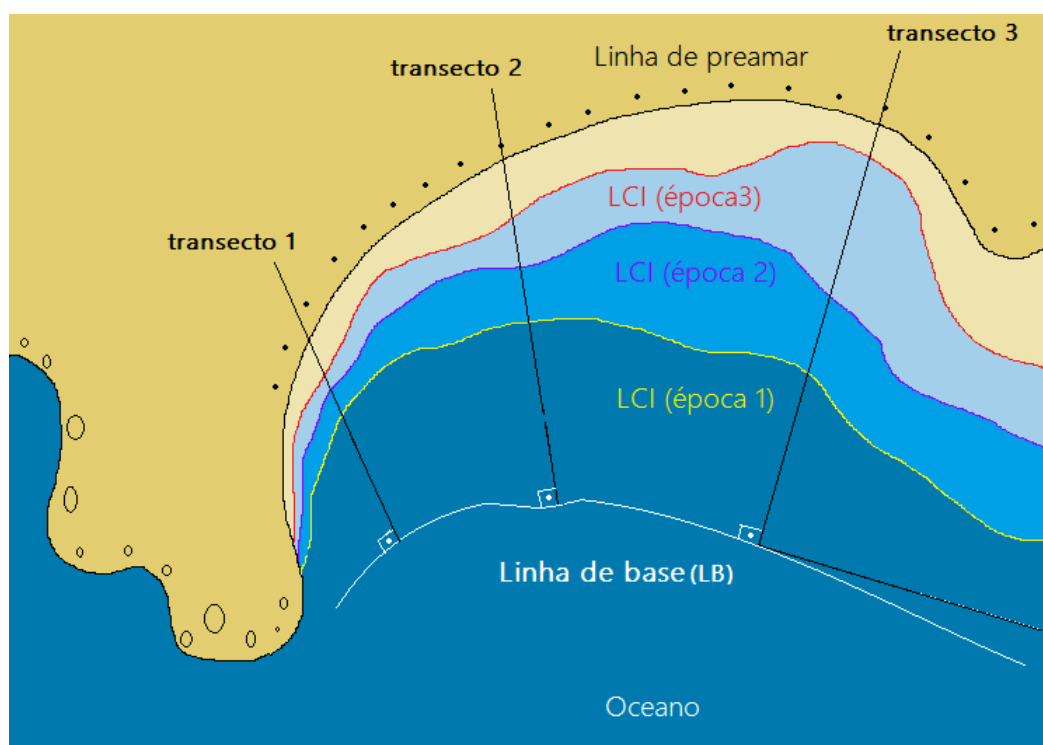
Muitas referências que tratam deste assunto utilizam transectos perpendiculares à linha de costa como unidade de amostra (BOAK; TURNER, 2005). Ao longo de cada transecto são medidas as distâncias relativas entre cada LCI ao longo do tempo. Estas medições têm origens arbitradas e, portanto, podem ser negativas ou positivas. Entretanto é comum estabelecer uma linha de base (LB) no continente, ou no mar, que acompanhe de forma aproximada as LCI e sirva como origem destas medições (ver Figura 11).

Dependendo do objetivo do trabalho, pode-se optar por utilizar um único transecto por praia ou múltiplos transectos, os quais podem apresentar espaçamento constante ou irregular. Como cada transecto é medido individualmente, as estatísticas podem ser calculadas de maneira que cada transecto represente uma amostra da linha de costa a ser estimada, independentemente da quantidade de épocas utilizadas.

Dessa forma, a escolha da quantidade de transectos e intervalo de tempo entre as LCI, aliadas à precisão das medições, determina a capacidade de detectar os sinais que representam os fenômenos responsáveis por modificar o aspecto visual da linha costeira (VOS et al., 2019).

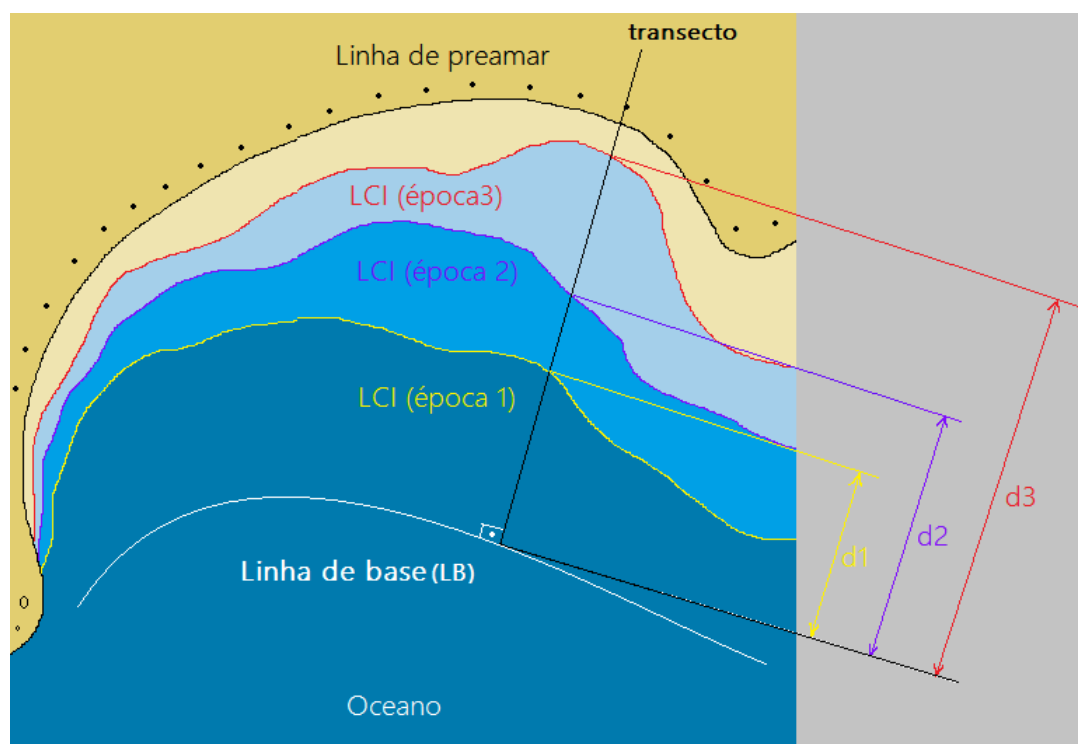
A Figura 12 ilustra uma situação hipotética em que foram definidos três transectos pelos quais podem ser medidas distâncias planas a partir de uma linha de base LB até cada LCI.

Figura 11 – Ilustração das LCI para três épocas com transectos e LB no mar.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 – Ilustração da medição de três distâncias planas para LCIs observadas em três épocas.



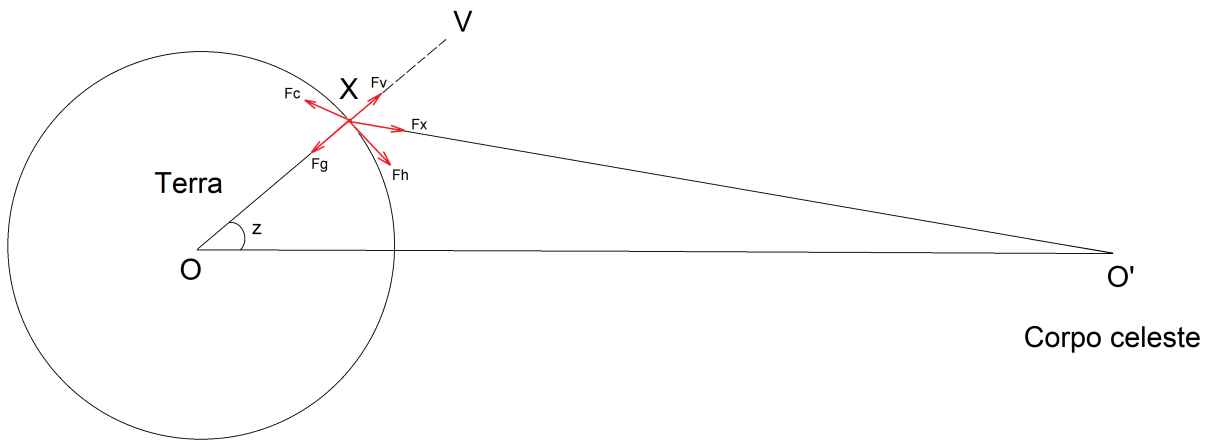
Fonte: elaborado pelo autor.

2.3 Fundamentos para o modelo de estimação da linha de preamar

2.3.1 Marés

O estudo da força geradora de marés é baseado na lei de atração de Newton, e seu desenvolvimento teórico parte da consideração de que a massa da Terra está concentrada no centro O de um modelo esférico e sofre a influência das forças gravitacionais de um corpo celeste centrado em O' , conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Geometria da força geradora de marés.



Fonte: elaborada pelo autor baseado em Franco (2009).

Na elaboração desta teoria são desenvolvidas as equações que envolvem as forças gravitacionais exercidas pelos corpos celestes, em especial a Lua e o Sol, em relação ao centro da Terra O e pontos quaisquer (X) em sua superfície, em que V representa o vetor da direção vertical a partir de X .

As forças envolvidas são: a força gravitacional exercida pela massa da Terra F_g , a força centrífuga F_c e a força de tração exercida pelos corpos celestes (DOODSON; WARBURG, 1941), decomposta nas componentes vertical F_v e horizontal F_h . As equações 2.3 e 2.4 descrevem estas componentes em função do ângulo zenital z e do ângulo $V XO'$ presentes na Figura 13.

$$F_v = -F_c \cos(z) + F_x \cos V XO' \quad (2.3)$$

$$F_h = -F_c \sin(z) + F_x \sin V XO' \quad (2.4)$$

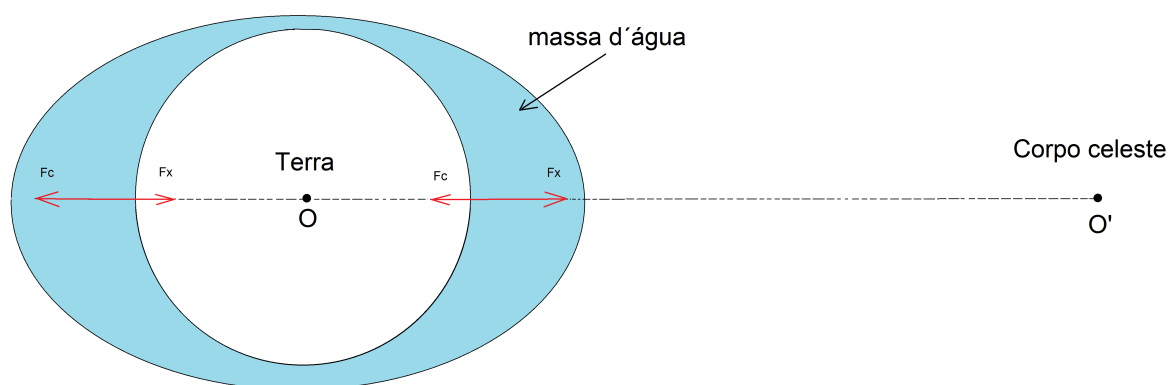
em que, F_v : componente vertical da força de tração; F_h : componente horizontal da força de tração; F_c : força centrífuga; e F_x : força de tração.

A saber, a ação da força geradora de maré solar é bem inferior àquela da maré lunar, apesar da Lua ser um astro de massa consideravelmente menor que a do Sol (FRANCO, 2009).

Isso ocorre uma vez que a distância Terra-Sol é da ordem de 390 vezes maior que a distância Terra-Lua.

Além disso, ao considerar a influência dessas forças sobre o plano do equador observa-se que suas resultantes geram marés altas tanto quando o corpo celeste está à distância máxima, quanto à distância mínima do ponto X arbitrário sobre a superfície. Isto ocorre pois no primeiro caso prevalece a ação da força de tração F_x e no segundo caso prevalece a ação da força centrífuga F_c , conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Influência da força de tração e da força centrífuga sobre as massas d'água terrestres.



Fonte: elaborada pelo autor baseado Franco (2009).

Um ponto curioso do desenvolvimento desta teoria é que a componente da força de tração que mais influencia na resultante da força geradora de marés é a horizontal F_h , sendo a componente vertical F_v desprezível. A explicação para este fenômeno é que o nível das marés resulta de uma acumulação da massa líquida em determinados pontos para os quais é arrastada pela força de tração (FRANCO, 2009), portanto os únicos fatores que se opõem à ação desta força são o atrito e a viscosidade da água. Com base nisso é possível concluir que as marés e as correntes de maré (estudo sobre o deslocamento horizontal das águas oceânicas) são fenômenos interligados e coexistentes.

Então, partindo do estudo dos movimentos do Sol e da Lua, em relação à Terra, são conhecidas as variações horárias de elementos astronômicos notáveis para o desenvolvimento harmônico das marés. Estes elementos e suas variações horárias estão listadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Variações horárias de elementos astronômicos notáveis.

Elemento	Descrição	Variação °/h
s	longitude média da Lua	0,5490165
h	longitude média do Sol	0,0410686
p	longitude do perigeu	0,0046418
N	latitude do nodo ascendente em relação à eclíptica	0,0022064
p'	longitude do periélio	0,0000020

Fonte: Franco (2009).

As expressões do desenvolvimento harmônico vêm do produto de séries trigonométricas. Franco (2009) considera o desenvolvimento desta técnica longo, porém simples, pois necessita ser aplicada repetidas vezes do início ao fim.

Para compreender este desenvolvimento, tem-se como exemplo as séries trigonométricas do tipo:

$$A_1 \cos(a_1) + A_2 \cos(a_2) + \dots \quad (2.5)$$

$$A'_1 \cos(a'_1) + A'_2 \cos(a'_2) + \dots \quad (2.6)$$

em que, A e a são elementos de séries trigonométricas quaisquer. Eis que, o produto de um termo qualquer da primeira série com outro da segunda série produz um resultado do tipo:

$$A_j A'_n \cos(a_j) \cos(a'_n) = \frac{A_j A'_n}{2} [\cos(a_j + a'_n) + \cos(a_j - a'_n)] \quad (2.7)$$

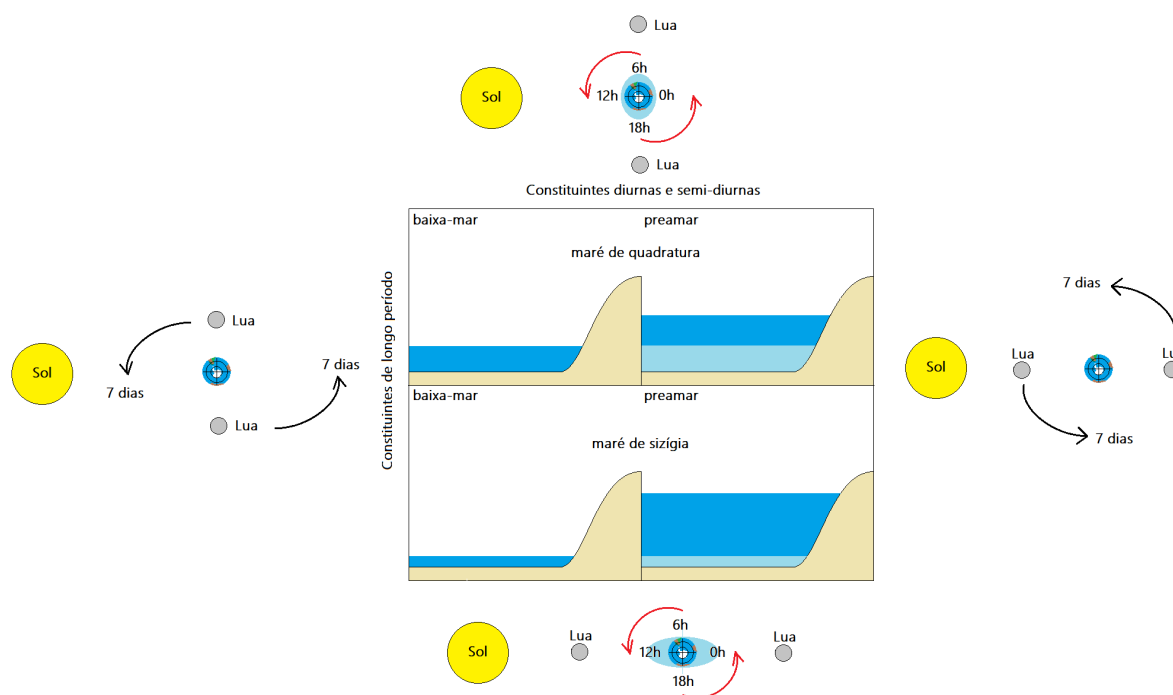
Assim, a regra geral para produto de séries trigonométricas é:

"O produto de dois termos produzirá invariavelmente à soma de dois outros cujos ângulos são, respectivamente, iguais à soma e à diferença dos ângulos daqueles termos, e cujos coeficientes são ambos iguais à metade dos produtos dos coeficientes dos referidos termos." (FRANCO, 2009)

Com base nisto, é feito o desenvolvimento das equações considerando o movimento dos elementos astronômicos do Sol da Lua sobre a esfera celeste para a separação dos termos puros (que não possuem a latitude do nodo ascendente N) e os termos nodais (que possuem N) e agrupamento por três tipos de espécies de marés: longo período, diurna e semidiurna. Esse elemento é importante pois representa um ponto na esfera celeste onde o plano da órbita lunar cruza com a órbita do plano da eclíptica, sendo que seu movimento retrógrado completo dura cerca de 18,61 anos e seu efeito deve ser considerado em estudos cujas observações são em período inferior a este, como é o caso da análise harmônica de marés, em que normalmente são observados 365 dias.

A Figura 15 ilustra a dinâmica luni-solar e sua relação com o ciclo de maré de 28 dias, que corresponde a aproximadamente ao período de translação da Lua em torno da Terra.

Figura 15 – Dinâmica luni-solar.



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, o Quadro 2 resume os principais termos ou constituintes conhecidas através do desenvolvimento harmônico descrito por Franco (2009) e suas respectivas frequências.

Quadro 2 – Principais constituintes harmônicas puramente astronômicas.

Constituinte	Frequência °/h
Z0	0,000000
Ssa	0,0821373
Mf	1,0980330
P1	14,9589314
O1	13,9430356
K1	15,0410686
$\phi 1$	15,123206
OO1	16,1391017
M2	28,9841042
S2	30,000000
K2	30,0821373

Fonte: *Tidal Constituents* - OHI (2017).

Os nomes destas constituintes podem ser encontrados em diversas bibliografias sobre o assunto (CARTWRIGHT; TAYLER, 1971). Porém, é destacado aqui a Mf conhecida como constituinte lunar quinzenal, pois está relacionada com a maré de sizígia e cujo ciclo possui um período aproximado de 15 dias.

Este tipo de desenvolvimento, baseado em elementos astronômicos, considera apenas a maré estática. Ao todo, atualmente existem mais de 400 constituintes harmônicas conhecidas quando considerados outros tipos de interações astronômicas e de águas rasas. O desenvolvimento detalhado pode ser consultado em ([CARTWRIGHT; TAYLER, 1971](#)). A tabela completa de constituintes é divulgada no endereço virtual da OHI (Organização Hidrográfica Internacional)(<https://iho.int/>).

A análise harmônica de marés consiste em determinar as constantes harmônicas (amplitude e fase) para as constituintes que influenciam no regime de marés em um determinado local, através da observação horária dos níveis de maré utilizando marégrafos. A Equação 2.8 é utilizada na análise harmônica clássica ([FRANCO, 2009](#)).

$$h(t) = Z_o + \sum_{i=0}^n (A_i \cdot \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t - \phi_i)) + v(t) \quad (2.8)$$

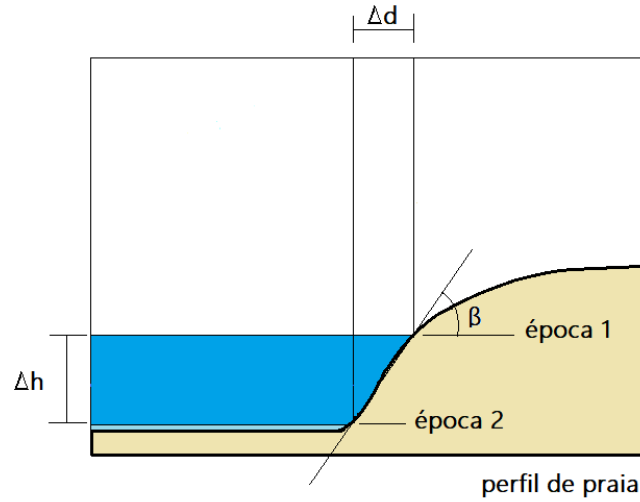
em que, $h(t)$: altura da maré no instante t ; Z_o : nível médio do mar local (NMM); A_i : amplitude da maré local para a i -ésima constituinte; f_i : frequência da i -ésima constituinte (conhecida); t : instante da observação em horas; ϕ_i : fase da i -ésima constituinte no instante $t = 0$; n : número de constituintes analisadas; e $v(t)$: resíduo das observações.

2.3.2 Declividade do perfil de praia

Alguns trabalhos mostram que, nas regiões onde há baixa declividade do perfil de praia, é possível relacionar geometricamente a altura da maré local com a distância planimétrica observada nas imagens orbitais ([VOS et al., 2019](#)). Isto ocorre em especial, nas regiões próximas à linha do Equador, devido à intensidade das marés astronômicas ([FRANCO, 2009](#); [PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020](#)), estas regiões possuem regimes denominados macro e meso marés como pode ser visto em [Mentaschi et al. \(2018\)](#).

A Figura 16 ilustra a geometria da situação que é desenvolvida na Equação 2.9.

Figura 16 – Geometria da relação entre a altura da maré (vertical) e distâncias planas.



Fonte: elaborado pelo autor.

$$\tan\beta = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{h_2 - h_1}{d_2 - d_1} \quad (2.9)$$

em que: $\tan\beta$: declividade do perfil de praia; h_2 : altura de maré na época 2; h_1 : altura de maré na época 1; d_2 : distância plana medida a partir de uma linha de base (LB) para a época 2; e d_1 : distância plana medida a partir de uma linha de base (LB) para a época 1.

Alguns autores utilizam um único valor de declividade universal $\tan\beta = 0,1$ (VOS et al., 2019), mas é possível estimar um valor que represente toda a região analisada, como apresentado em Vos et al. (2020).

Assim, na Seção 4.2.1 será desenvolvido o modelo de projeção da maré (PM) baseado neste princípio.

3 Material

Os materiais utilizados se resumem em imagens orbitais multiespectrais, dados de altura de maré obtidos para a área de interesse, um microcomputador munido com o programa QGIS 3.24, um interpretador para a linguagem de programação *Python* 3.9 e o ambiente de desenvolvimento *PyCharm 2021.2.3 9 Community Edition*, além de bibliotecas específicas para a aplicação desejada.

3.1 Área de Interesse

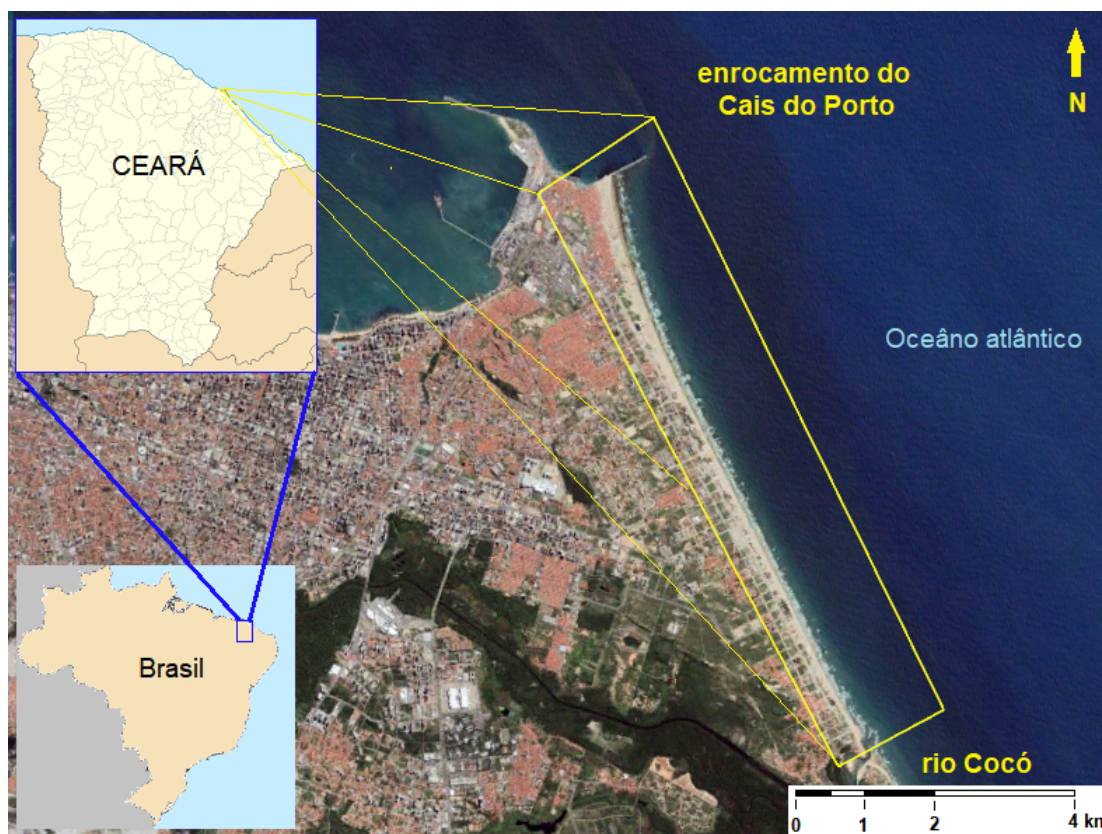
A Praia do Futuro (Figura 17), localizada na cidade de Fortaleza-CE, foi escolhida pois está situada em um ambiente com grandes amplitudes de maré, 2 a 4m (regime de mesomaré) e baixas declividades, de 0,3% a 4,7%, conforme destacado por [Albuquerque \(2008\)](#), observam-se as menores declividades ao norte da faixa de areia. Além disso, esta praia possui como característica geológica a grande variabilidade sedimentar ao longo da orla, em que predomina grãos de areia grossos ao sul e grãos finos ao norte.

De forma complementar, a Praia do Futuro possui grande circulação de turistas na época do verão e com bom índice de balneabilidade quando comparada com outras praias da região metropolitana de Fortaleza-CE ([ALBUQUERQUE, 2008](#)).

A área de interesse (AOI) do estudo é a faixa de areia com extensão de 7,5 km que se inicia na foz do rio Cocó ao sul e segue até o espigão do Titanzinho ao norte, como mostrado na Figura 17.

A localização dessa praia, nas proximidades da linha do Equador (latitude de 3° 45' S), associada com as características morfodinâmicas, facilita a detecção dos sinais da maré astronômica ([FRANCO, 2009](#); [PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020](#); [VOS et al., 2019](#)) na linha de costa, através de imagens orbitais.

Figura 17 – Área de interesse - Praia do Futuro, Fortaleza - CE.



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de imagem do Google Earth.

3.2 Imagens Orbitais

3.2.1 Critério para escolha da fonte da informação

O produto escolhido para a extração da linha de costa é proveniente da plataforma Sentinel-2 da ESA (European Space Agency) ao nível de processamento 2A, isto significa que essas imagens são ortorretificadas e possuem a reflectância corrigida dos efeitos da atmosfera (<https://sentinel.esa.int/>).

Além disso, são disponibilizadas as bandas espectrais infravermelho próximo (Banda 8) e verde (Banda 3) por meio do sensor *MultiSpectral Instrument* MSI. Com essas bandas é possível estimar o Índice Espectral de Água NDWI (*Normalized Difference Water Index*).

A obtenção dessas imagens pode ser feita através do portal *Copernicus Open Access Hub* da (ESA), disponível em página da internet, e pode ser acessada através do link: <https://scihub.copernicus.eu/>. Entretanto, para facilitar o processo, foi feita utilizado a plataforma *Google Earth Engine*, que pode ser configurada na página web através do link: <https://code.earthengine.google.com/>. As informações básicas que foram utilizadas como entrada para a requisição das imagens desejadas foram: as datas, a coleção, a área de interesse e as bandas espectrais. O Quadro 3 apresenta todas as bandas espectrais disponibilizadas por esta

plataforma orbital, sendo destacadas em negrito as bandas que serão utilizadas.

Quadro 3 – Bandas espectrais MSI *Sentinel-2*.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)
1 - Coastal aerosol	0,443	60
2 - Blue	0,490	10
3 - Green	0,560	10
4 - Red	0,665	10
5 - Vegetation Red Edge	0,705	20
6 - Vegetation Red Edge	0,740	20
7 - Vegetation Red Edge	0,783	20
8 - NIR	0,842	10
8A - Vegetation Red Edge	0,865	20
9 - Water vapour	0,945	60
10 - SWIR - Cirrus	1,375	60
11 - SWIR	1,610	20
12 - SWIR	2,190	20

Neste ponto, vale ressaltar que não foram utilizadas as bandas SWIR para aproveitar a maior resolução espacial das bandas NIR no intuito de garantir melhor definição da posição da linha de costa instantânea.

3.2.2 Critério para escolha do período

O período escolhido foi entre Junho e Setembro de 2018, pois houve grande disponibilidade de imagens ópticas do Sentinel-2, sem nuvens, sobre a área de interesse. Ademais, este período coincide com o início da estiagem na região, que vai de Julho a Fevereiro (ALBUQUERQUE, 2008).

Assim, foram obtidas imagens em 12 datas diferentes em que as cenas foram adquiridas às 10h da manhã em horário local (13h UTC) conforme apresentado no Quadro 4.

3.2.3 Critério para escolha da imagem para extrair uma das linha de referência

A escolha da imagem para extrair uma das linhas de referência levou em consideração uma técnica utilizada por diversos autores e compilada em Boak e Turner (2005), a qual utiliza-se a marca deixada pela última preamar de sizígia para extraí-la visualmente. Assim, basta obter uma imagem tomada no período da preamar de sizígia para obter este indicativo de forma aproximada. Neste caso, foi escolhida a imagem tomada em 27/08/2018, pois atende a este critério, conforme mostrado na tabela da Figura 18.

Quadro 4 – Data e hora exata da aquisição das imagens do Sentinel-2 utilizadas.

Época	Data	Hora - UTC
1	2018-06-13	13:02:46
2	2018-06-23	13:02:47
3	2018-06-28	13:02:45
4	2018-07-08	13:02:45
5	2018-07-13	13:02:48
6	2018-07-18	13:02:45
7	2018-08-02	13:02:47
8	2018-08-12	13:02:46
9	2018-08-17	13:02:40
10	2018-08-22	13:02:46
11 - (referência)	2018-08-27	13:02:38
12	2018-09-01	13:02:45

Figura 18 – Trecho da tábua de marés de Agosto de 2018, em que é destacado o horário e a altura da última preamar antes da tomada da imagem no dia 27.



TÁBUA

DE MARÉS



FORTALEZA

agosto de 2018

DIA




MARÉS DE FORTALEZA

		1ª MARÉ		2ª MARÉ		3ª MARÉ		4ª MARÉ		COEFICIENTE	
24	Sex		▲ 5:35 ▼ 17:36	3:07 2,5 m ▲	9:28 0,5 m ▼	15:35 2,4 m ▲	21:44 0,6 m ▼	72	alto		
25	Sáb		▲ 5:35 ▼ 17:36	3:52 2,6 m ▲	10:10 0,4 m ▼	16:18 2,5 m ▲	22:25 0,5 m ▼	78	alto		
26	Dom		▲ 5:35 ▼ 17:36	4:33 2,7 m ▲	10:47 0,3 m ▼	16:56 2,6 m ▲	23:01 0,4 m ▼	83	alto		
27	Seg		▲ 5:34 ▼ 17:36	5:10 2,8 m ▲	11:20 0,3 m ▼	17:31 2,7 m ▲	23:35 0,4 m ▼	85	alto		
28	Ter		▲ 5:34 ▼ 17:36	5:43 2,8 m ▲	11:51 0,3 m ▼	18:03 2,7 m ▲		85	alto		
29	Qua		▲ 5:33 ▼ 17:35	0:08 0,4 m ▼	6:16 2,7 m ▲	12:21 0,3 m ▼	18:34 2,7 m ▲	83	alto		
30	Qui		▲ 5:33 ▼ 17:35	0:41 0,4 m ▼	6:49 2,7 m ▲	12:52 0,4 m ▼	19:06 2,7 m ▲	78	alto		
31	Sex		▲ 5:33 ▼ 17:35	1:14 0,5 m ▼	7:25 2,6 m ▲	13:24 0,5 m ▼	19:41 2,6 m ▲	70	alto		

©2023

tabuademares.com

Fonte: <https://tabuademares.com/>

Como pode ser notado no destaque na Figura 18, neste dia a preamar ocorreu às 5h10min (hora local), como neste horário a maré atingiu o valor máximo para este mês (2,8m), fica evidente que trata-se do período de sizígia. Neste dia a imagem foi tomada às 10h02min (hora local). Pode-se notar na Figura 19 a diferença entre a LCI no momento da aquisição da imagem e a linha de preamar.

Figura 19 – Imagem de referência tomada em 27/08/2018.



Fonte: ESA (2018).

3.3 Dados de maré

3.3.1 Alturas de maré utilizadas no cálculo da declividade

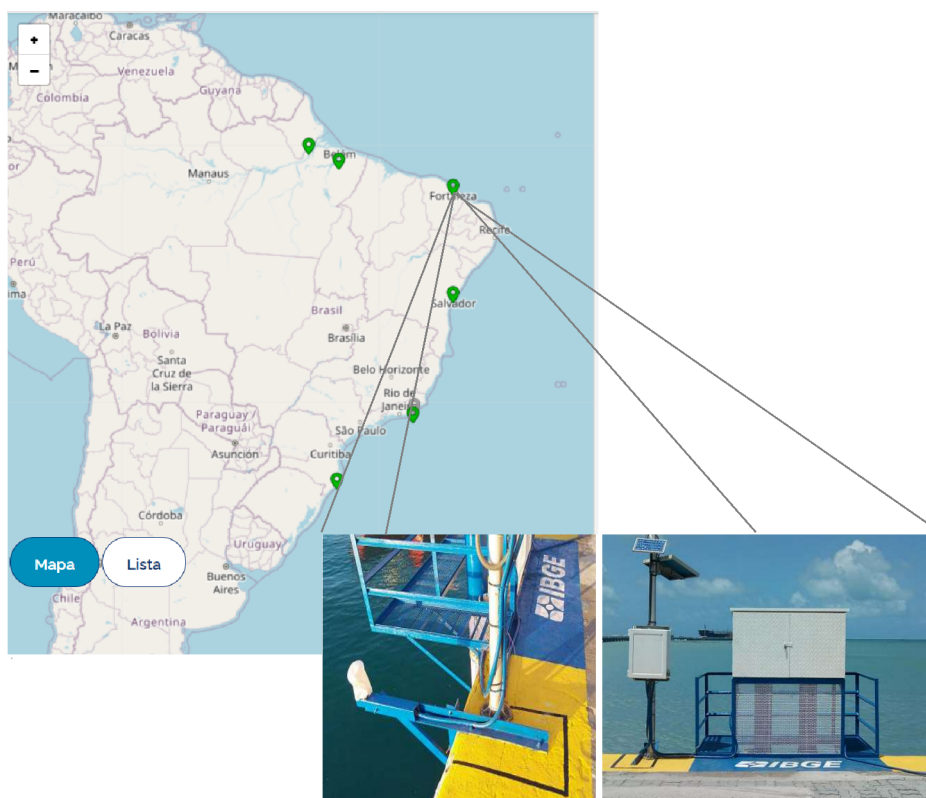
A escolha dos dados de altura maré levou em consideração a proximidade com o horário da tomada das imagens pelo sensor da plataforma Sentinel-2. As alturas de maré utilizadas são obtidas pela interpolação entre os valores de maré registrados imediatamente antes e depois da tomada de cada cena. Esta informação, da altura da maré, podem ser obtidas através da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que disponibiliza esta informação das estações maregráficas permanentes com intervalo de 5 min. O Quadro 5 mostra os valores estimados para a altura da maré no instante das tomadas das imagens, interpolados a partir das informações da RMPG.

Quadro 5 – Data e hora das observações de maré.

Época	Data	Hora - UTC	Altura da maré (m)
<i>1</i>	2018-06-13	13:02:46	4,78
<i>2</i>	2018-06-23	13:02:47	6,14
<i>3</i>	2018-06-28	13:02:45	5,29
<i>4</i>	2018-07-08	13:02:45	6,60
<i>5</i>	2018-07-13	13:02:48	4,81
<i>6</i>	2018-07-18	13:02:45	7,24
<i>7</i>	2018-08-02	13:02:47	6,76
<i>8</i>	2018-08-12	13:02:46	5,01
<i>9</i>	2018-08-17	13:02:40	7,07
<i>10</i>	2018-08-22	13:02:46	5,78
<i>11</i>	2018-08-27	13:02:38	5,32
<i>12</i>	2018-09-01	13:02:45	6,86

A Figura 20 mostra a estação com sigla EMFOR, localizada no porto de Mucuripe em Fortaleza-CE, instalada no cais do porto.

Figura 20 – Estação EMFOR que pertence à RMPG do IBGE.

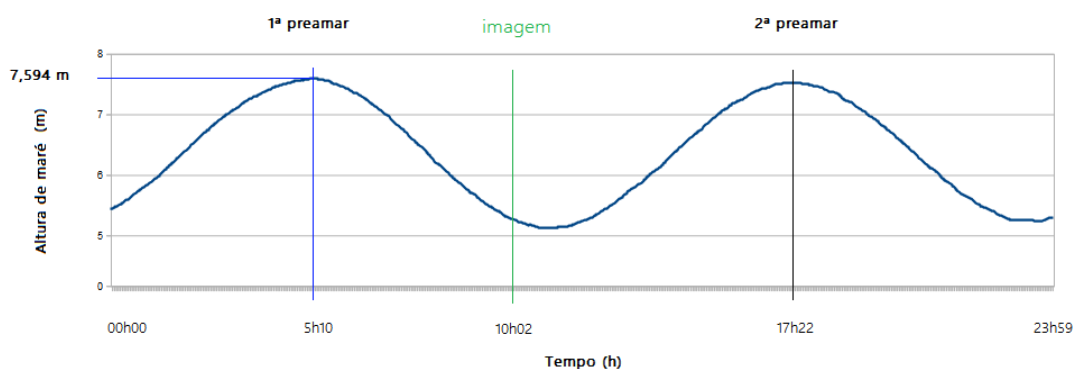


Fonte: <https://www.ibge.gov.br/>

3.3.2 Altura de maré da Linha de Preamar de Sizígia

A altura da maré utilizada como referência foi a primeira preamar do dia 27/08/2018, que ocorreu às 5h10, horário local, e registrou 7,594 m no referencial vertical local da estação maregráfica da RMPG. A Figura 21 apresenta as alturas de maré registradas para este dia em função do tempo.

Figura 21 – Alturas de maré registradas no dia 27/08/2018 e suas preamares, para a estação EMFOR.



Fonte: <https://www.ibge.gov.br/>

Entretanto, como a imagem não foi tomada próxima ao horário da preamar, a linha

d'água instantânea visível não representa a linha de preamar, assim, foi utilizado como indicativo a marca deixada pela última preamar, que pode ser vista representada pela cor azul na Figura 19.

3.4 Linha de costa da NOAA utilizada como referência

A segunda linha de referência empregada foi a linha de costa disponibilizada pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), que faz parte de um conjunto de dados geográficos de alta resolução denominado *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database* (GSHHG), cujo banco de dados *World Vector Shorelines* (WVS) é a base para as linhas costeiras. A Figura 22 mostra a linha de costa brasileira obtida a partir do site da NOAA.

Figura 22 – Linha de costa do litoral do Brasil disponibilizada pelo NOAA, publicada em 2017.



Fonte: Adaptado a partir de <https://shoreline.noaa.gov>.

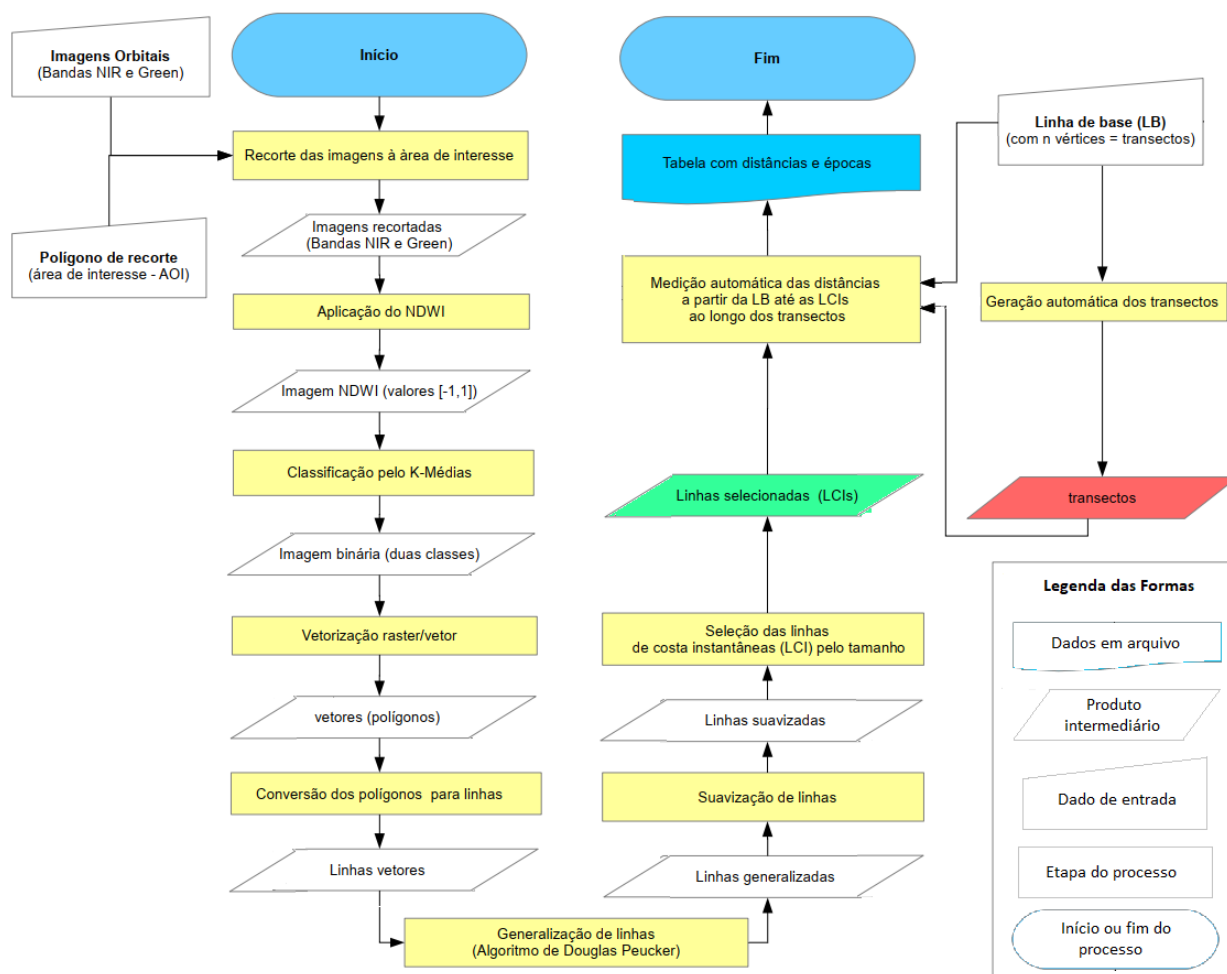
De acordo com a NOAA, os dados WVS passaram por um processamento extensivo e estão livres de inconsistências internas, servindo para trabalhos na escala de 1:100.000. Este produto utiliza como referencial vertical a média das preamares *Mean High Water* (MHW)(WESSEL; SMITH, 1996).

4 Método

4.1 Extração e medição das linhas de costa instantâneas em imagens orbitais

A partir das imagens adquiridas, inicia-se a etapa de extração das distâncias das linhas de costa instantâneas LCIs. Esta atividade inicia-se pelo recorte das imagens orbitais do Sentinel-2 para a área de interesse até a obtenção das distâncias medidas das LCIs a partir de uma linha de base (LB) ao longo dos transectos, sendo estas distâncias, bem como as respectivas épocas, armazenadas em uma tabela. Para tanto, o método foi implementado no *software* QGIS, o qual é executado em 10 etapas conforme mostrado no diagrama da Figura 23.

Figura 23 – Diagrama do método utilizado para extração das LCIs a partir de imagens orbitais.



Fonte: elaborado pelo autor.

O método utilizado consiste em recortar as imagens utilizando como limite um polígono que contém a área de interesse (etapa 1), em seguida aplicar o NDWI utilizando as bandas infravermelho e verde (etapa 2). O produto deste índice é uma imagem de única banda em tons de cinza com alto contraste entre a água e os demais elementos da cobertura do solo, assim, segue-se com a classificação por K-médias em duas classes gerando uma imagem binária que destaca os corpos d'água da cena (etapa 3).

Então, a partir da imagem binária faz-se a vetorização automática na borda dos pixels que separam essas classes, que por consequência representam a LCI (etapa 4). Seguem-se então alguns processamentos sobre essas linhas para fazer uma conversão de elementos poligonais em linhas, seguida da remoção do aspecto serrilhado e suavização das linhas (etapas 5, 6 e 7, respectivamente), por meio do Algoritmo de Douglas Peucker.

Por fim, é feita a localização automática das linhas que representam a LCI e a medição

das distâncias planas entre a linha de base e as LCI ao longo de cada transecto. Estes dados são armazenados em uma tabela no final do processo (etapas 8, 9 e 10, respectivamente).

As configurações utilizadas em cada etapa da extração e medição das linhas de costa instantâneas LCIs está resumida no Quadro 6. Ao ser executado para todas as épocas, o produto final é um arquivo .csv, cuja primeira coluna contém a data-hora e as demais colunas as distâncias medidas para cada época (linhas) ao longo de cada transecto. A Figura 24 mostra a parte inicial deste arquivo.

Quadro 6 – Configurações/Parâmetros utilizados na etapa de extração das distâncias.

Etapa	Descrição	Parâmetro / valor
1	Recorte das imagens à área de interesse	nenhum parâmetro
2	NDWI	nenhum parâmetro
3	Classificação por K-médias	número de classes = 2
4	Vetorização (raster/vetor)	nenhum parâmetro
5	Conversão de polígonos para linhas	nenhum parâmetro
6	Generalização de linhas	Douglas-Peucker; lim. = 10 m
7	Suavização de linhas	ângulo máximo = 80°
8	Seleção das LCIs	comprimento $\geq 0,8 \times$ comp. da LB
9	Geração automática dos transectos	tamanho dos transectos = 600 m
10	Medição das distâncias das LCIs à LB	nenhum parâmetro

Figura 24 – Início do arquivo .csv gerado no fim da etapa de medição das distâncias.

```

1 Data,t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9,t10,t11,t12,t13,t14,t15,t16,t17
2 2016-04-24-13-02-40,175.3,121.4,155.4,187.4,176.7,169.9,147.7,1
3 2016-09-11-13-02-44,171.1,168.4,151.1,182.9,210.6,186.5,173.1,1
4 2017-04-19-13-02-47,187.6,173.3,199.0,210.4,215.8,200.5,179.3,1
5 2017-09-21-13-02-34,171.7,167.2,166.4,166.2,152.1,182.0,136.3,1
6 2018-04-24-13-02-49,182.3,180.6,175.8,190.3,203.9,193.0,185.4,1
7 2018-09-01-13-02-45,160.7,141.1,198.9,195.1,196.0,185.5,177.8,1
8 2019-04-29-13-03-17,176.6,138.8,152.9,175.4,184.9,171.0,161.0,1
9 2019-09-11-13-03-14,113.0,154.5,134.5,150.6,188.7,169.6,147.6,1
10 2020-04-28-13-03-09,180.1,160.0,166.4,190.2,196.3,175.5,145.5,1
11 2020-09-10-13-03-17,179.6,150.0,176.0,197.5,199.9,179.0,169.6,1
12 2021-04-18-13-03-08,171.9,154.5,164.6,147.6,192.2,176.8,167.3,1
13 2021-09-10-13-03-10,155.3,156.7,151.2,184.6,174.1,183.1,150.6,1

```

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Estimação da linha de preamar de sizígia (LPS)

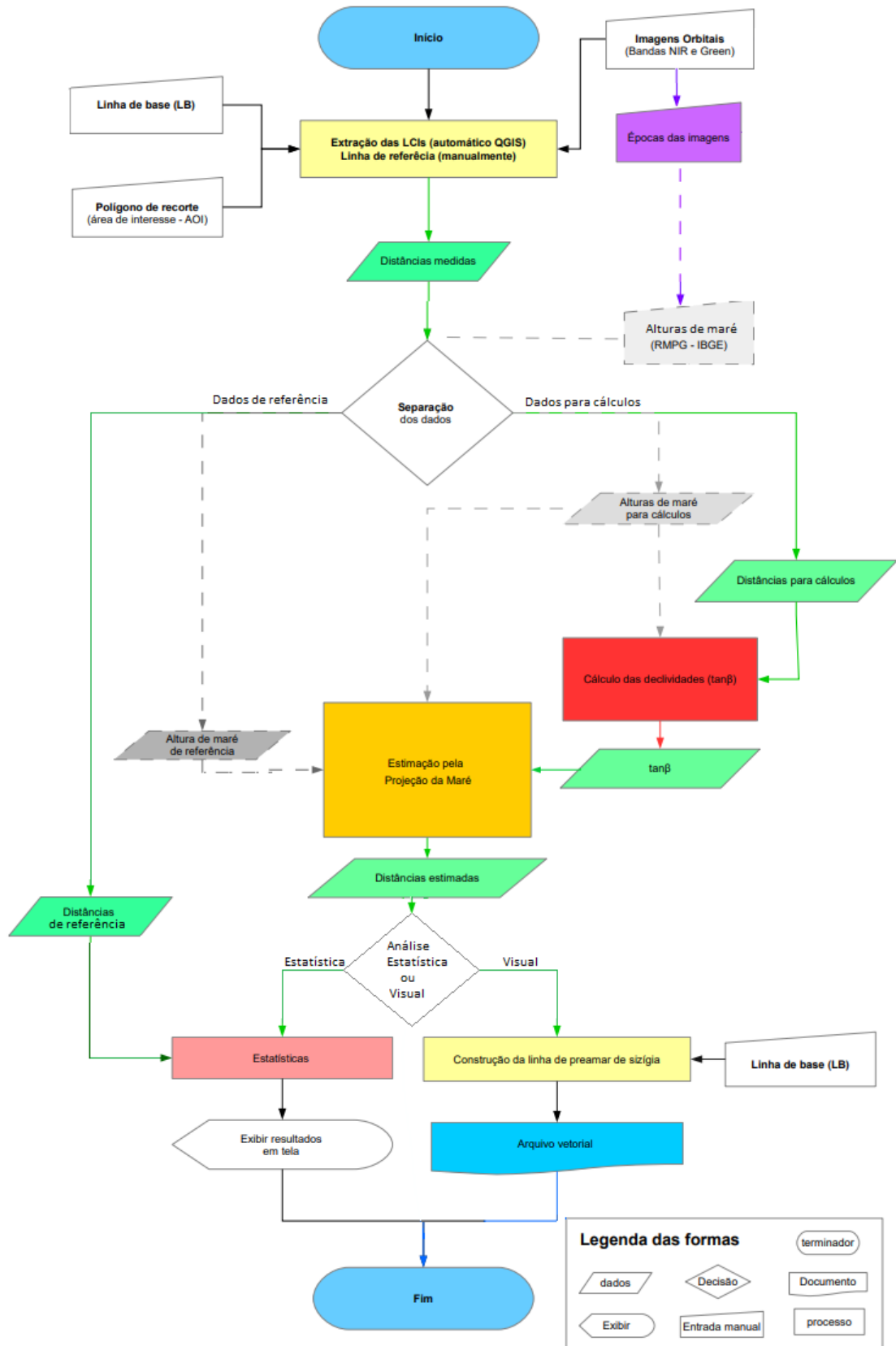
O objetivo desta etapa é estimar a linha da preamar de sizígia (LPS) conhecendo-se a altura no instante desta preamar e a declividade do perfil de praia. A altura da maré é obtida através do registro em um marégrafo próximo ao local de interesse e as declividades do perfil de praia são estimados através de uma sequência de imagens orbitais em que se conhece a altura da maré no mesmo instante, desde que estas imagens não sejam tomadas no instante da preamar de sizígia, pois isso anularia a necessidade de aplicação de modelos, uma vez que o indicativo da LPS poderia ser extraído da imagem de forma direta, pois coincidiria com a linha de costa instantânea (neste caso a LCI seria igual à LPS).

Dessa forma, a declividade estimada por meio desta metodologia encontra limitações dependendo das imagens utilizadas, sendo a qualidade influenciada pela resolução espacial e pelos erros geométricos associados. É importante ressaltar que abordagens convencionais, como o uso de topografia e levantamento LiDAR, tendem a oferecer resultados mais precisos. No entanto, ao optar por utilizar imagens disponibilizadas gratuitamente ao usuário, os custos são minimizados, tornando-se uma alternativa viável para atender aos objetivos, mesmo que com algumas limitações inerentes à qualidade da imagem.

O modelo empregado é a projeção de maré (PM), conforme expresso na Equação 4.3, sendo aplicado de forma individual para cada transecto. Essa abordagem parte do princípio de que o sinal da altura da maré ao longo da linha costeira supera as incertezas provenientes dos fatores meteorológicos, e pressupõe que o perfil da praia mantém pouca variação durante o período analisado.

Com base neste princípio, o diagrama da Figura 25 ilustra as etapas do método empregado. O método inicia com a aplicação da etapa de extração de distâncias das LCIs, seguida pela estimação da LPS, cálculos dos erros, estatísticas e construção da LPS em forma de arquivo vetorial *shapefile*.

Figura 25 – Diagrama do método utilizado para a estimativa da LPS.

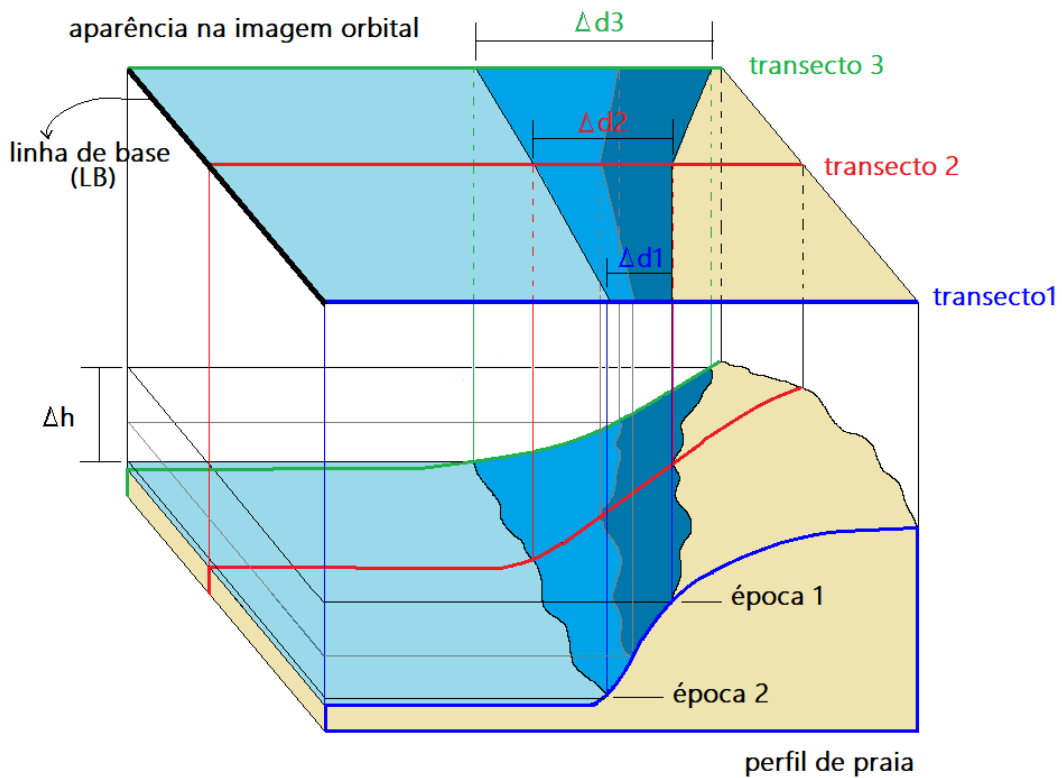


Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.1 Estimação pela projeção da maré (PM)

O modelo de projeção da maré (PM) se baseia no fato de que nas regiões onde o perfil de praia seja conhecido, por meio do ângulo $\tan\beta$, é possível relacionar a altura da maré local com a distância planimétrica observada nas imagens orbitais. Apesar de ser possível utilizar um valor universal (10%) para a declividade ou estimar um valor que represente toda a região analisada (VOS et al., 2019), a rigor, para cada perfil de praia existe um valor de declividade distinto. A Figura 26 ilustra essa situação para 2 épocas e 3 transectos.

Figura 26 – Ilustração da relação geométrica entre a distância horizontal e a altura de maré por transecto.



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da Figura 26 pode-se observar que para cada transecto, a mesma variação de altura da maré Δh , em sua projeção plana ortogonal Δd , muda ao longo do tempo em virtude da diferença de declividade entre os transectos.

Ao longo de um transecto, para duas épocas ($N = 2$) esta declividade pode ser estimada pela Equação 2.9, mas quando $N > 2$ tem-se redundância. Então, o valor de $\tan\beta$ pode ser estimado a partir dos valores médios de Δh e Δd .

No entanto, as origens da medição das alturas de maré e das distâncias planas são diferentes, enquanto $h(t)$ é medida em relação ao zero da régua da estação maregráfica $d(t)$ é medido em relação à linha de base (LB). Assim, arbitrando as origens para seus valores médios $\bar{h}$ e $\bar{d}$ a Equação 2.9 pode ser desenvolvida conforme a Expressão 4.1.

$$\tan\beta = \frac{\frac{(h(t_1)-\bar{h})+(h(t_2)-\bar{h})+\dots+(h(t_N)-\bar{h})}{N}}{\frac{(d(t_1)-\bar{d})+(d(t_2)-\bar{d})+\dots+(d(t_N)-\bar{d})}{N}} = \frac{\sum_{i=1}^N (h(t_i)-\bar{h})}{\sum_{i=1}^N (d(t_i)-\bar{d})} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta_{h_i}}{\sum_{i=1}^N \Delta_{d_i}} \quad (4.1)$$

em que, $\tan\beta$: declividade da amostra do perfil de praia; $h(t)$: altura da maré no instante t ; $\bar{h}$: nível médio da altura da maré observada; $d(t)$: distância plana da LCI para o instante t ; $\bar{d}$: distância média observada para o transecto; e N : número de épocas.

Porém, como os valores médios $\bar{h}$ e $\bar{d}$ são calculados a partir das próprias observações, invariavelmente os somatórios $\sum_{i=1}^N \Delta_{h_i}$ e $\sum_{i=1}^N \Delta_{d_i}$ são iguais a 0. Para contornar este problema, faz-se a raiz quadrada do quadrado da Equação 4.1, então tem-se o desenvolvimento conforme a Expressão 4.2

$$\tan\beta = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \Delta_{h_i}}{\sum_{i=1}^N \Delta_{d_i}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (h(t_i) - \bar{h})^2}{\sum_{i=1}^N (d(t_i) - \bar{d})^2}\right)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (h(t_i) - \bar{h})^2\right)}}{\sqrt{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (d(t_i) - \bar{d})^2\right)}} = \frac{\sigma_h}{\sigma_d} \quad (4.2)$$

em que, σ_h e σ_d são os desvios-padrão das alturas de maré h e das distâncias planas d , respectivamente, medidas ao longo de um transecto para N épocas.

Assim pode-se afirmar que:

"A declividade de um perfil de praia pode ser estimada pela razão entre o desvio-padrão das alturas de maré registradas e o desvio-padrão das distâncias horizontais medidas a partir de uma linha de base ao longo de um transecto."

Por fim, conhecendo a declividade $\tan\beta$, é possível projetar a maré observada para estimar a posição da linha de preamar de sizígia LPS em cada transecto no instante t , bastando conhecer a altura de maré neste instante, utilizando a Equação 4.3 da PM, que é a mesma Equação 2.9 mas isolando $d(t)_{LPS}$.

$$d(t)_{LPS} = \frac{h(t)_{LPS} - \bar{h}_{LCIs}}{\tan\beta} + \bar{d}_{LCIs} \quad (4.3)$$

O Quadro 7 resume os elementos de entrada, saída e parâmetros do modelo de Projeção de Maré (PM). Portanto, o modelo PM não possui parâmetros a serem ajustados. A partir do conhecimento da declividade $\tan\beta$ ao longo do transecto, dos valores médios $\bar{h}_{LCIs}$ e $\bar{d}_{LCIs}$ e da altura de maré no instante da preamar de sizígia $h(t)_{LPS}$. A distância estimada para a LPS $d(t)'_{LPS}$ é calculada de forma direta.

Quadro 7 – Elementos de entrada e saída do modelo PM.

Entrada	Saída
$\tan\beta$: declividade da amostra do perfil de praia, $\bar{d}_{LCIs}$: média das distâncias planas das LCIs observadas, $\bar{h}_{LCIs}$: média das alturas de maré observadas e $h(t)_{LPS}$: altura da maré no instante da LPS.	$d(t)_{LPS}$: distância plana estimada para a LPS

4.3 Análise dos resultados

4.3.1 Análise dos erros

As estatísticas foram calculadas a partir do erro de estimação da Linha de Preamar de Sizígia (LPS), conforme mostrado na Equação 4.4. Deste modo, os dados das 12 épocas foram utilizados para realizar os cálculos necessários para estimar $d_{LPS-modelo}$, que são as distâncias estimadas para a LPS pelo modelo, e em seguida determinar o erro do modelo.

$$Erro_{modelo} = d_{LPS-modelo} - d_{referência} \quad (4.4)$$

em que, $Erro_{modelo}$ é o vetor de erros calculado para cada transecto e $d_{referência}$ são as distâncias medidas para a linha de referência em relação a mesma linha de base (LB).

As linhas de referência que serão empregadas neste trabalho são duas: a linha visual da marca d'água extraída manualmente a partir de uma imagem de satélite do Sentinel-2, tomada na maré de sizígia e a linha de costa disponibilizada pela NOAA referida ao MHWS.

Assim, para a execução desta etapa foi implementado, em *Python*, um *script* denominado ANALICOS (acrônimo para "ANálise de LInha de COsta"), cujos dados de entrada são as épocas, as distâncias medidas na etapa de extração de cada LC, detalhada no tópico anterior, e as alturas de maré adquiridas da RMPG do IBGE.

Também foi analisado o gráfico e o histograma dos erros de previsão para cada transecto, baseando-se na média, desvio-padrão e na curva da função de densidade de probabilidade (f.d.p.) normal.

Além disso, foram selecionadas outras três estatísticas utilizadas na literatura sobre o assunto, para avaliar o desempenho do modelo. Estas estatísticas são: Raiz quadrada do erro médio quadrático RMSE (do inglês *Root Main Square Error*); Coeficiente de correlação (CC); e Percentual médio do erro absoluto MAPE (do inglês *Mean Absolute Percentage Error*), sendo as respectivas equações apresentadas na sequência:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (do_i - dp_i)^2} \quad (4.5)$$

$$CC = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (do_i - dp_i)^2}{\sum_{i=1}^n (do_i - média(do))^2}} \quad (4.6)$$

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(do_i - dp_i)}{do_i} \right| \quad (4.7)$$

em que, n : número de transectos; do_i : distância observada no i-ésimo transecto para a época de referência; e dp_i : distância prevista no i-ésimo transecto para a época de referência.

4.3.2 Análise visual

Para finalizar, a partir das distâncias estimadas para a LPS, foi gerado um arquivo vetorial (*shapefile*) desta linha estimada pelo modelo. Esta linha estimada e armazenada no formato *shapefile* foi criado com o propósito de comparar com as duas linhas de referência por análise visual, sobre uma composição colorida da imagem orbital, tomada no período da maré sizígia em 27/08/2018.

5 Resultados e discussões

Os resultados foram obtidos utilizando como amostra distâncias medidas ao longo de 189 transectos perpendiculares à faixa de areia, sendo o primeiro transecto aquele mais ao norte (número 0) e o último mais ao sul (número 188). A Figura 27 mostra a posição destes transectos, sobrepostos à imagem obtida pela composição RGB do sensor MSI do Sentinel-2.

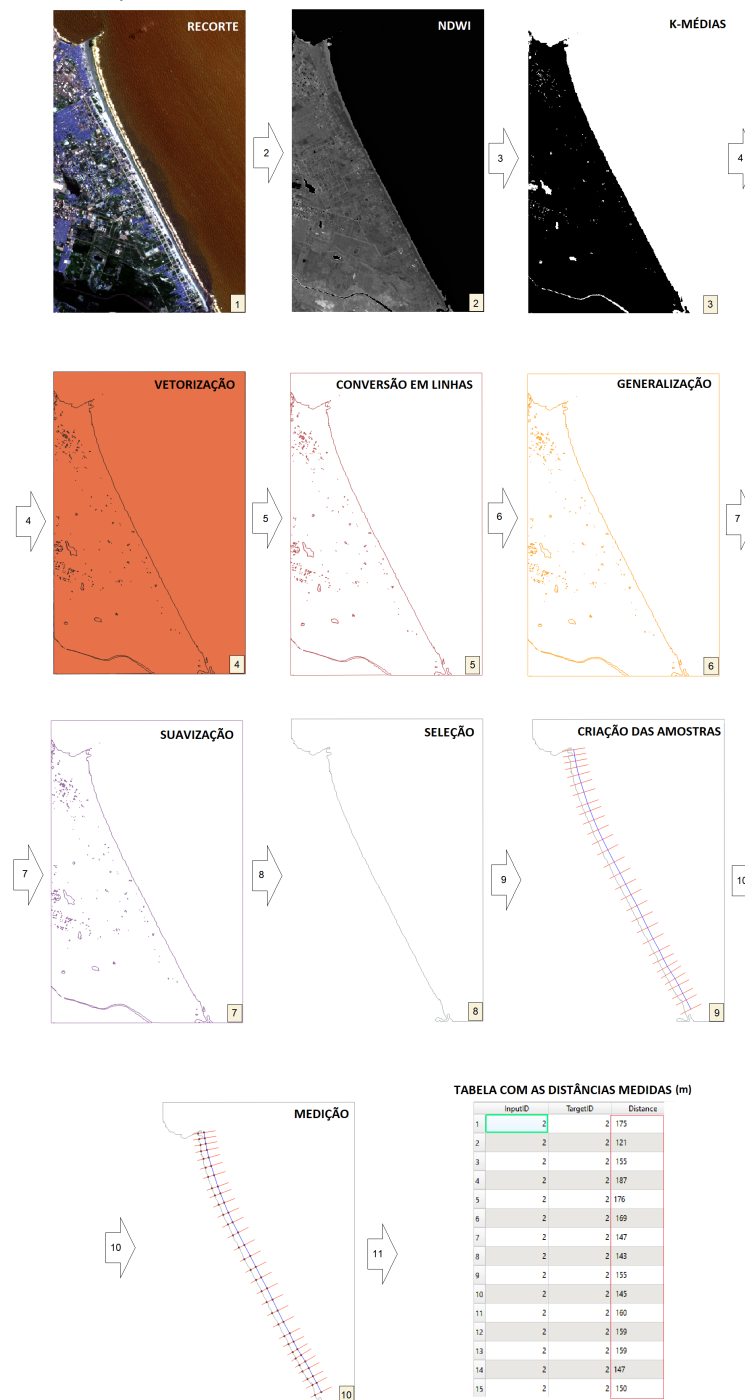
Figura 27 – Disposição dos transectos arbitrados na Praia do Futuro, Fortaleza-CE.



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 28 ilustra os produtos gerados pelo método de extração de linha de costa instantânea (LCI) implementado no *software* QGIS, conforme o diagrama da Figura 23.

Figura 28 – Ilustração dos produtos intermediários da etapa de extração das distâncias nas imagens orbitais, realizado no QGIS.



Fonte: elaborado pelo autor.

Como é possível perceber na Figura 28, são realizadas 10 etapas de processamento até obter a tabela com as distâncias planas medidas a partir da linha de base (LB) até a LCI,

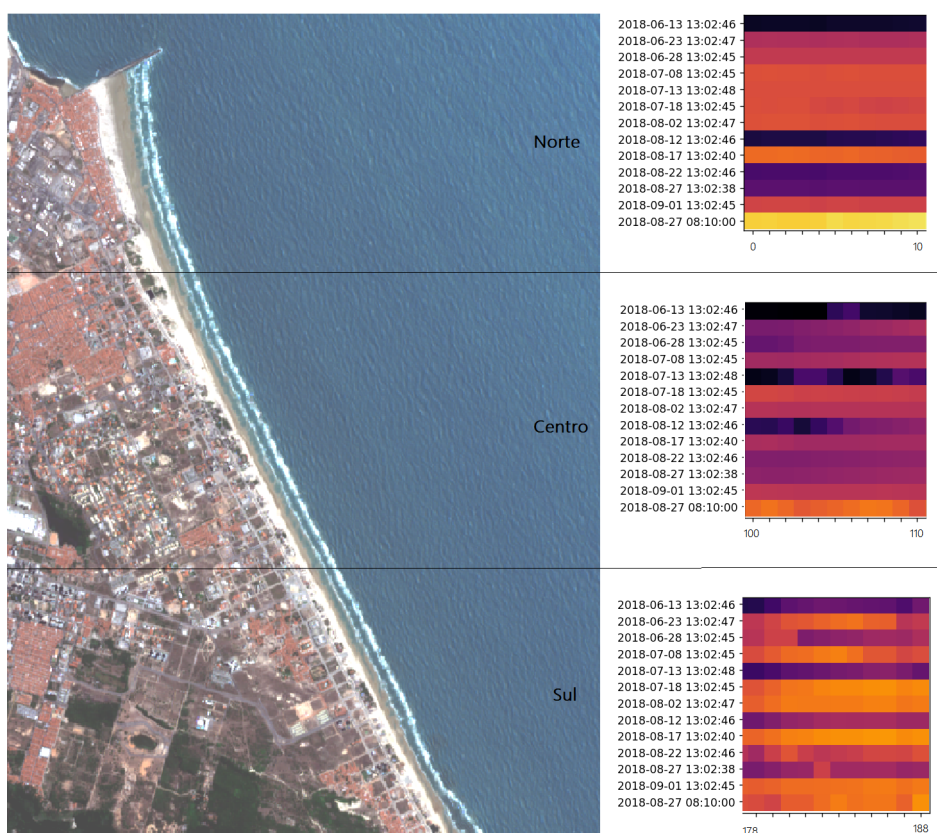
ao longo de cada transecto. Este processo se repete para cada cena escolhida, assim, com os dados das LCI de várias épocas é possível a realizar análises sobre a LC.

5.1 Análise das medições

As distâncias medidas sobre as imagens de satélites estão representadas em duas formas: matriz de cores e gráfico.

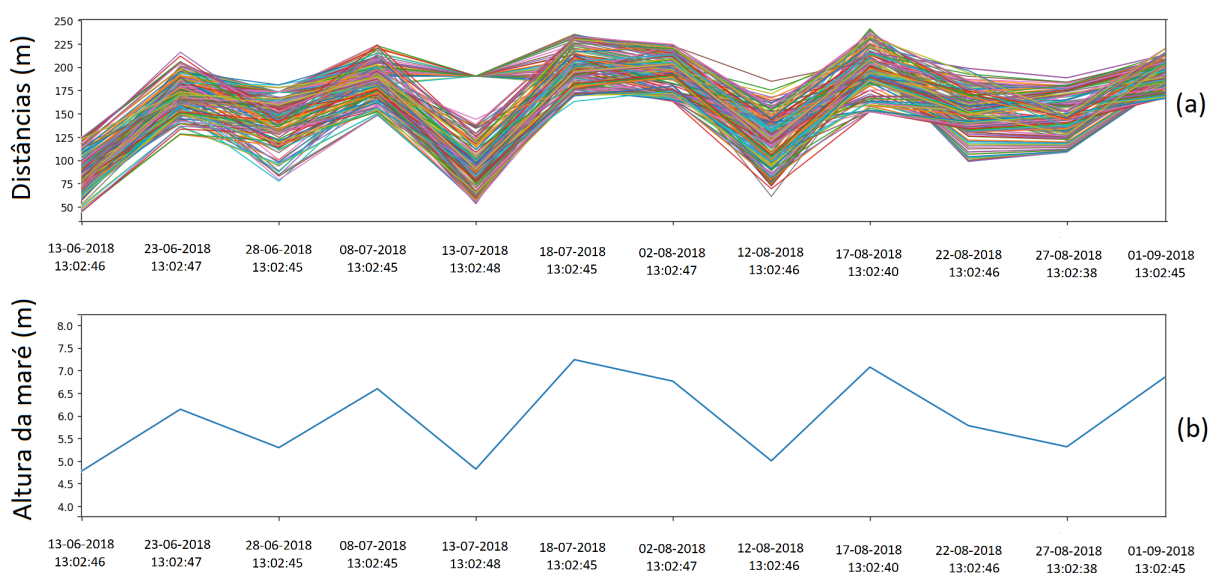
Na Figura 29 são mostradas as distâncias medidas representadas na forma de uma matriz de cores para três trechos da faixa de praia: trecho norte (transectos 0 a 10), centro (transectos 100 a 110) e sul (transectos 178 a 188). Em cada linha tem-se a época e nas colunas os transectos correspondentes. As cores quentes indicam valores maiores e as cores frias indicam valores menores. Na Figura 30 são mostradas as mesmas distâncias, na forma de um gráfico, onde nas abscissas são mostradas as épocas e no eixo das ordenadas o valor medido em metros. Neste gráfico cada linha refere-se a uma amostra da LC, ou seja, um transecto. Na mesma figura é mostrada a maré observada para as mesmas épocas.

Figura 29 – Representação das distâncias medidas em cores quentes (valor alto) e frias (valor baixo).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 30 – Distâncias medidas representadas em forma gráfica (a) e altura de maré observada no instante de cada imagem (b).



Fonte: elaborado pelo autor.

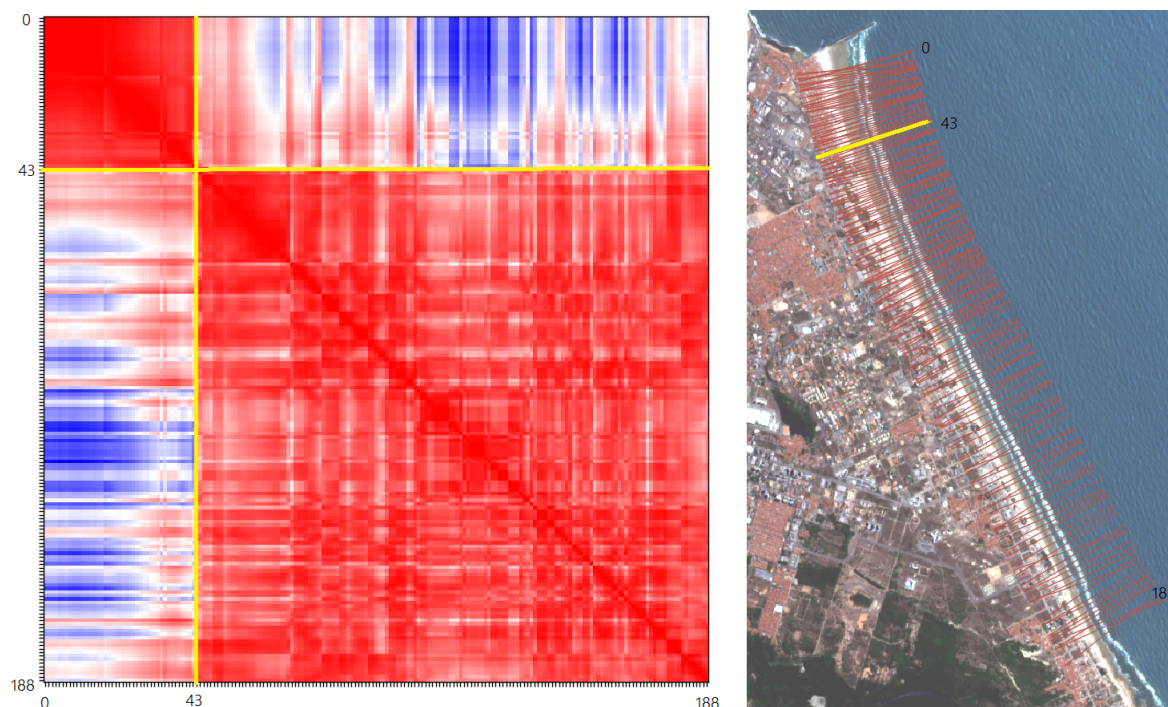
A partir das Figuras 29 e 30 é possível notar visualmente que há sinais sazonais que causam aproximação e afastamento da LC que afetam as amostras, sendo estes sinais coerentes com as observações de marés. Ademais, é possível verificar que o sinal da maré é mais evidente na porção norte da faixa de areia (entre os transectos 0 e 43).

De forma a complementar a análise, foi gerada uma matriz de correlação das amostras, que pode ser visto na Figura 31. A cor vermelha indica correlação positiva e azul negativa. A partir desta representação é possível verificar que as amostras mais ao norte (transectos 0 a 43) possuem alta correlação positiva. Pode-se notar que ocorre um aumento gradativo no comportamento aleatório para os transectos situados mais ao sul (transectos 44 a 188).

Assim, é possível inferir que, nestas condições, em uma mesma faixa de areia há regiões que devido às suas características é possível detectar sinais sazonais de mudança, mesmo que a quantidade de épocas das amostras sejam limitadas.

Outra possibilidade para essa evidente separação em dois grupos, entre os transectos 43 e 44, pode ser que características morfodinâmicas do perfil de praia influenciem na dinâmica costeira.

Figura 31 – Representação da correlação das amostras, positiva (vermelha) e negativa (azul).



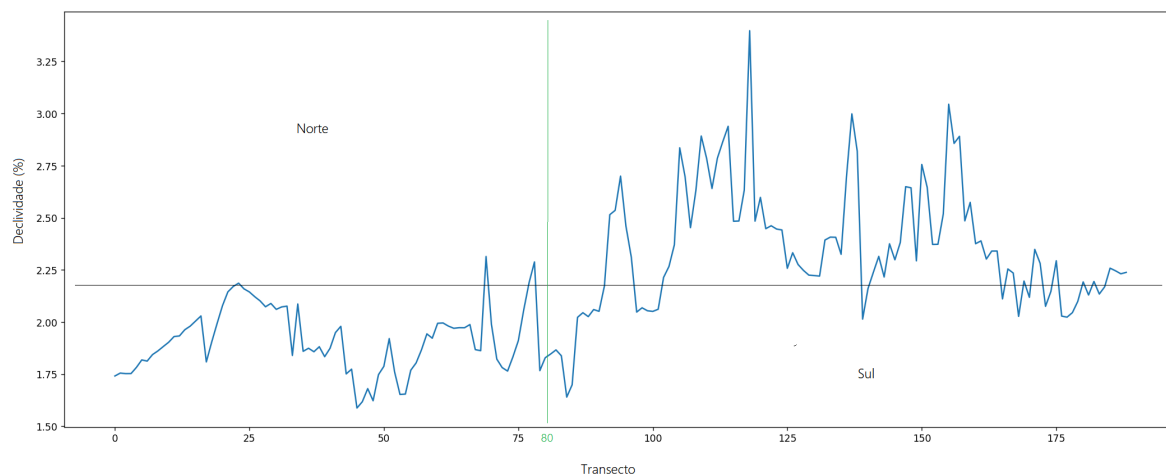
Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 Análise das declividades

A declividade média calculada para o perfil de praia, na área deste estudo, foi de 2,2%. Pelo gráfico da Figura 32 é possível verificar que na região ao norte, entre os transectos 0 e 80, a declividade é menor do que ao sul, entre os transectos 80 e 188, com valor mínimo de 1,6% e máximo de 3,4%. Este resultado é compatível com o apresentado por [Albuquerque \(2008\)](#) que utilizou técnicas topográficas para análise de perfis desta mesma praia entre 2004 e 2006, associando esses valores com o tamanho dos grãos de areia.

Outro aspecto importante do trabalho de [Albuquerque \(2008\)](#) é que os perfis foram medidos bimestralmente, apresentando variação sazonal de até 0,5% ao longo dos dois anos. Isto reforça que a técnica apresentada nesta dissertação só tem validade em análises de curto prazo, uma vez que as LCIs extraídas de imagens tomadas em intervalos de tempo longos não modelam tais variações nos perfis.

Figura 32 – Gráfico das declividades (ordenadas) em percentual por transecto (abscissas).



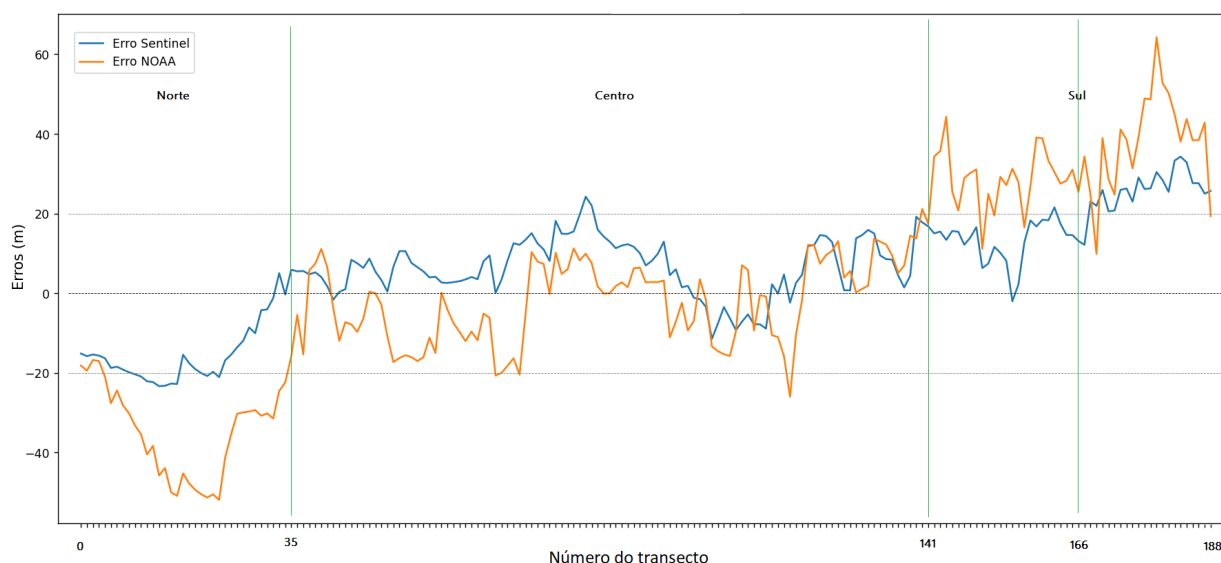
Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 Análise gráfica e estatística dos erros

Para a análise dos erros na determinação da LPS foram utilizadas duas linhas de referência, como mencionado na Seção 4.3.1. Na sequência são mostrados o gráfico dos erros, o histograma dos erros das amostras, a curva da função de densidade de probabilidade normal, bem como os valores de média, desvio-padrão, RMSE, CC e MAPE.

O gráfico da Figura 33 mostra o comportamento dos erros na estimação da LPS em metros (ordenadas) para cada transecto (abscissas). As linhas pretas pontilhadas indicam o intervalo de $\pm 20\text{m}$ que equivale ao limite de incerteza para o levantamento de linhas de costa com feições naturais, estipulado pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI), isto equivale a dois *pixels* nas imagens orbitais utilizadas.

Figura 33 – Gráfico dos erros na estimativa da LPS para cada transecto, em azul consideram-se os erros em relação à LPS visível em uma imagem do Sentinel e em laranja consideram-se os erros em relação à linha de costa da NOAA.



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos gráficos da Figura 33 é possível verificar que, de um modo geral, a LPS estimada pelo modelo de Projeção de Maré apresenta erros semelhantes em relação às duas linhas de referência.

Porém, no trecho ao norte entre os transectos 0 e 35, os erros em relação à linha da NOAA extrapolam o limite de -20 m, chegando a -50 m, enquanto em relação à LPS Sentinel ficam próximos do limite de -20m. Isto pode ter ocorrido pelo fato de que a forma de definir a linha de referência são distintas, trata-se do trecho em que o sinal da maré é mais evidente.

Ademais, no trecho central entre os transectos 35 e 141, os erros para ambas referências ficaram dentro do limite de ± 20 m, no geral. Isto evidencia o quanto este modelo é adequado para situações em que o sinal da maré é perceptível nas imagens.

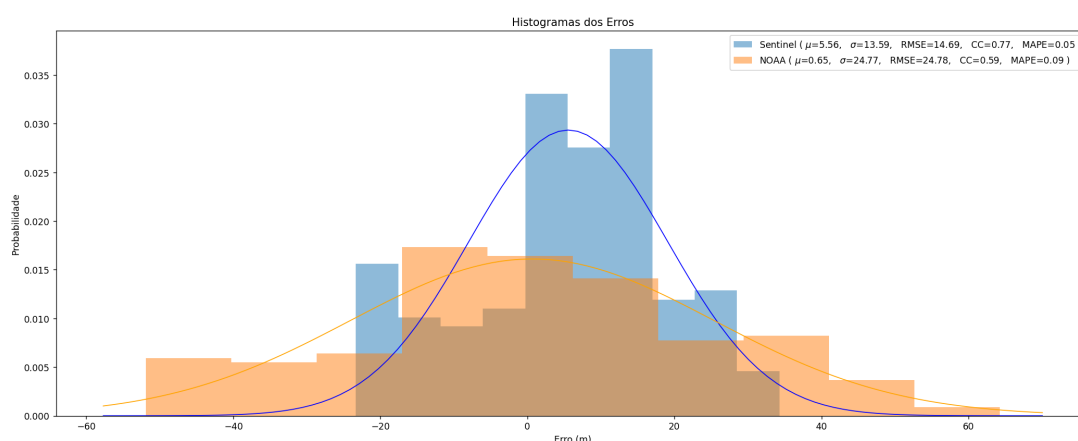
Entretanto, no trecho sul, entre os transectos 141 e 188, houve piora gradativa dos erros para ambas as linhas de referência. Supõe-se que isto ocorreu pois tal trecho é o mais afastado da estação que registrou as alturas de maré e tem proximidade com a foz do rio Cocó, proporcionando menor correlação com o sinal da maré registrado nas imagens, prejudicando o cálculo da declividade dos perfis de praia.

A Figura 34 mostra os histogramas dos erros de estimação da LPS pelo modelo de Projeção de Maré em relação a duas referências: a LPS visível em uma imagem de satélite Sentinel-2 (na cor azul) e a linha de costa da NOAA (na cor laranja). Estes histogramas mostram que a maior parte dos erros possuem no máximo 20m (equivalente a dois *pixels* na imagem) para a primeira linha de referência (Sentinel), entretanto, para a segunda linha de

referência (NOAA) esses erros dobram no geral.

Os histograma dos erros em relação a referência da LPS visível na imagem do Sentinel-2 possui uma aparência de distribuição normal com um deslocamento sistemático positivo na ordem de grandeza de um pixel (10 m). Por outro lado, o histograma dos erros da referência da LC da NOAA não apresenta, aparentemente, aspecto de distribuição normal.

Figura 34 – Histograma dos erros em relação às duas referências.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 1 mostra os valores calculados para as estatísticas dos erros, são elas: média μ , desvio-padrão σ , raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de correlação (CC) e percentual do erro médio absoluto (MAPE). Vale ressaltar que o MAPE mostra o percentual de erro médio absoluto.

Assim, analisando esta tabela é possível inferir que há um aumento de acerto quando a referência utilizada é a LPS visível na imagem Sentinel-2.

Tabela 1 – Valores das estatísticas para a comparação com as duas referências.

Estatística	Referência	
	LPS Sentinel	LC NOAA
Média μ	5,6 m	0,6 m
Desvio-padrão σ	13,6 m	24,8 m
Raiz quadrada do erro médio quadrático RMSE	14,7 m	24,8 m
Coeficiente de correlação CC	77%	59%
Percentual do erro médio absoluto MAPE	5%	9%

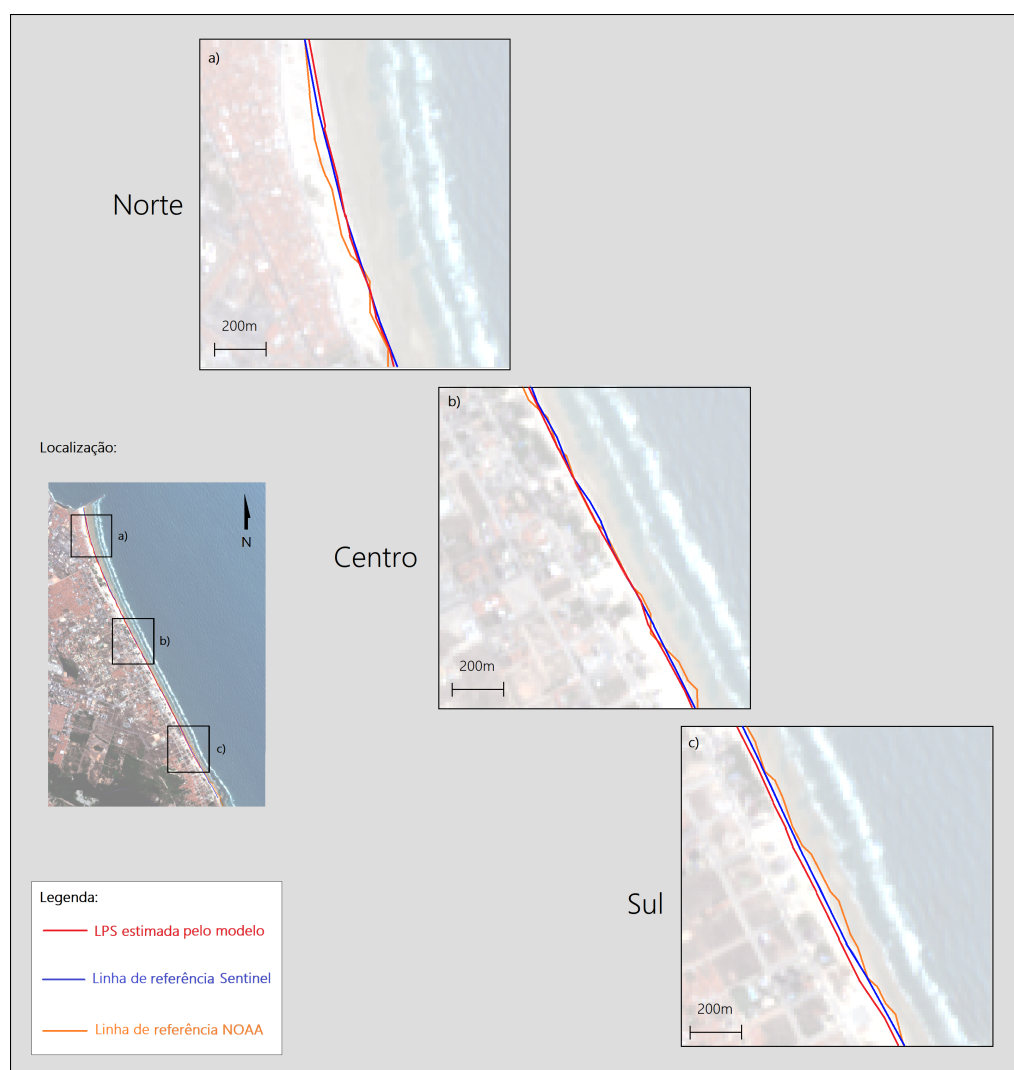
Apesar dos erros em relação à linha de referência da NOAA proporcionarem média mais próxima de zero, indicando menos erros sistemáticos, todas as demais estatísticas indicam que o modelo Projeção de Maré para a estimação da LPS se aproxima melhor da referência da LPS visível extraída da imagem Sentinel-2. No próximo tópico será apresentada a análise visual destes resultados.

5.4 Análise visual

A análise visual será feita pela comparação da LPS estimada pelo modelo com as linhas de referência.

A Figura 35 apresenta três trechos da faixa de areia da AOI, norte (a), centro (b) e sul (c), de forma a facilitar a visualização detalhada dos resultados em apenas uma página. Estas linhas foram plotadas sobre uma imagem Sentinel-2 em composição RGB tomada em 27/08/2018.

Figura 35 – Comparação visual entre a LPS estimada e as duas linhas de referência.



Fonte: elaborado pelo autor sobre uma imagem Sentinel-2 de 27/08/2018.

Assim, fazendo a análise visual da LPS estimada pelo modelo com as duas linhas de referência foi confirmado o resultado observado estatisticamente. Esta linha estimada (em vermelho) se aproximou mais da referência relacionada com a marca d'água deixada visualmente na imagem Sentinel-2 tomada no período da maré de sizígia (em azul).

No trecho norte, nota-se que a linha de costa da NOAA (em laranja) aparece mais avançada em direção ao continente, enquanto as outras duas linhas estão próximas. Já no trecho central, há pouca diferença entre as três linhas, por fim, no trecho sul a linha da NOAA aparece mais recuada em direção ao mar, enquanto a proximidade entre as outras duas linhas se repete.

Com base nestes resultados, é possível inferir que o modelo de Projeção de Maré (PM) proposto é capaz de estimar a linha de preamar de sizígia (LPS), resguardada a precisão que se almeja de acordo com a aplicação desejada.

Ademais, considerando que a linha de referência extraída diretamente da imagem Sentinel-2, com resolução espacial de 10m, tomada na preamar de sizígia seja a mais acurada, conclui-se que LPS estimada pelo modelo PM possui acurácia compatível, ou até melhor, do que a linha de costa disponibilizada pela NOAA. A saber, este produto atende a precisão exigida para produtos na escala de 1:100.000 de acordo com [Wessel e Smith \(1996\)](#).

5.5 Validação do produto para cartografia náutica

O valor máximo da incerteza total horizontal (THU - *Total Horizontal Uncertainty*) especificado pela OHI para levantamento da linha de costa é de 20m a 95% de nível de confiança ([OHI, 2020](#)). Assumindo o RMSE estimado como sendo equivalente ao erro padrão (EP) da linha de preamar de sizígia (LPS) estimada pelo modelo PM, e a referência mais confiável sendo a marca d'água deixada visualmente na imagem de satélite Sentinel-2 referente à preamar de sizígia de 27/08/2018, a Tabela 2, apresenta o resultado obtido.

Tabela 2 – Avaliação da LPS estimada com base no critério da OHI de 20m a 95% (n.c.).

Valor de referência	Resultado		
	EP	Erro 95% n.c.	Conclusão
RMSE	14,7 m	28,8 m	Não atende

Deste modo, com base no critério da OHI, esta metodologia utilizando os dados de imagens Sentinel-2 para extrair as LCI, não atenderia aos padrões exigidos para levantamentos hidrográficos.

Entretanto, o Exército Brasileiro publica a Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) Defesa F, que já está em sua segunda versão desde 2016 ([DSG, 2016](#)). Nesta norma é apresentado o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) que especifica os critérios para que um produto

vetorial digital possa ser aceito como referência dentro da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).

Assim, considerando o RMSE como erro padrão (EP) da linha de preamar de sizígia (LPS) estimada pelo modelo PM e a referência confiável sendo LPS visível na imagem de satélite Sentinel-2 referente à preamar ocorrida às 05h do dia 27/08/2018, a Tabela 3, apresenta o resultado obtido e a Figura 36 mostra um trecho do Quadro 1 apresentado em DSG (2016).

Tabela 3 – PEC-PCD para a LPS estimada.

Valor de referência	Resultado		
	EP	PEC-PCD 90% n.c.	Escalas atendidas
RMSE	14,7 m	24,18 m	1:25.000 (Classe D), 1:50.000 (Classe B), 1:100.000 (Classe A)

Figura 36 – Trecho do Quadro 1 da ET-ADGV.

PEC (1)	PEC - PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A ⁽²⁾	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B ⁽¹⁾	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C ⁽¹⁾	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D ⁽¹⁾	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Fonte: DSG (2016).

Portanto, este produto atenderia ao PEC-PCD Classe A para a escala 1:100.000, o que já era de se esperar, visto que a linha de costa da NOAA também pode ser utilizada para esta escala. Por fim, este resultado indica que esta LPS estimada atenderia também ao PEC-PCD Classe B para produtos na escala 1:50.000 e Classe D na escala 1:25.000.

5.6 Síntese dos resultados e análise crítica

Os resultados obtidos e apresentados nas seções anteriores indicam que os objetivos iniciais colocados foram alcançados. No entanto, observam-se algumas limitações no método proposto. Na sequência são discutidos, de forma sucinta, alguns pontos que merecem destaque:

- O termo *Mean High Water Springs (MHWS)* traduzido como linha média da preamar de sizígia tem seu significado associado com a determinação da maré astronômica. Então, a rigor, para que se tenha um valor médio que abrange todos os movimentos do sistema Terra, Lua e Sol; é necessário um conjunto de observações de maré com pelo menos 18,61 anos. Entretanto, nos estudos da Análise Harmônica de Marés é comum a observação

de poucos meses ou anos, aplicando correções nodais em virtude dos movimentos não-modelados (FRANCO, 2009). Neste estudo limitou-se a buscar a posição da Linha de Preamar no período de observação dos dados de entrada entre os meses de Junho e Setembro de 2018. Contudo, para se definir de forma acurada a altura da *Mean High Water Springs (MHWS)* deve-se preceder uma Análise Harmônica sobre os dados de maré da estação de referência. Portanto, este trabalho é limitado quando considera, apenas, a altura da primeira preamar de sizígia do dia 27/08/2018, ocorrida às 5h10, como indicativo para a altura da *Mean High Water Springs (MHWS)*;

- A análise proposta neste trabalho limita-se ao curto prazo, pois há aspectos da morfodinâmica costeira como a variação do perfil de praia ao longo do tempo, como discutido em Albuquerque (2008) que não foram considerados no modelo de Projeção de Maré;
- A acurácia da estimação das declividades realizada pelo método proposto está limitada à qualidade dos dados de entrada. Portanto, é relevante investigar os resultados para imagens orbitais de maior resolução, do que as utilizadas, visando avaliar a qualidade do modelo para estas situações;
- A metodologia para extração das LCI utilizando o NDWI e a classificação por K-médias, aqui apresentada, é apenas uma dentre as diversas possibilidades. Portanto, este trabalho limita-se ao uso de imagens ópticas, livre de nuvens na área de interesse e com as bandas no espectro verde e infra-vermelho disponíveis;
- Atualmente, existem aproximadamente 700 cartas náuticas brasileiras, de acordo com Plano Cartográfico Náutico Brasileiro, divulgado pela DHN e disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/294>>. Considerando os resultados obtidos neste trabalho, dessa totalidade de cartas náuticas, 200 não seriam atendidas por terem escalas superiores a 1:25.000; 300 seriam atendidas parcialmente com LC nas Classes B, C e D pela análise do PEC-PCD e 200 seriam atendidas completamente com LC na Classe A do PEC-PCD. Portanto, apesar de ter potencial como ferramenta para a produção e atualização das cartas náuticas, o método desenvolvido neste trabalho não substitui as técnicas convencionais como a topografia, geodésia, fotogrametria e/ou baseada no uso de dados LiDAR, para os produtos de maior acurácia.

6 Conclusões

A revisão bibliográfica realizada permitiu relacionar diversos conhecimentos que embasaram a definição do modelo utilizado no experimento, cujos resultados foram aqui apresentados. Das referências utilizadas destaca-se a revisão feita por [Boak e Turner \(2005\)](#), os fundamentos sobre maré apresentados por [Franco \(2009\)](#) e a metodologia de extração de linha de costa (LC) implementada por [Vos et al. \(2019\)](#).

A partir da fundamentação apresentada, foi possível verificar que a maioria dos trabalhos publicados neste tema têm como objetivo central o monitoramento de acreção e deposição de sedimentos em regiões de praias, decorrentes das dinâmicas costeiras. Por outro lado, alguns estudos se preocupam com o monitoramento de longo prazo associado com o aumento dos níveis globais dos mares, por exemplo. Entretanto, poucos são os estudos que têm por objetivo observar e modelar os sinais/eventos de curto prazo, como é o caso da preamar de sizígia.

Desta revisão, seguiu-se com o desenvolvimento da metodologia para a extração de medidas das linhas de costa instantâneas (LCIs) a partir de imagens orbitais ópticas. Nesta etapa, o uso do programa QGIS foi fundamental, por possuir uma série de ferramentas disponíveis, por meio de *toolboxes* além de uma *interface* amigável, o que muito facilita sua implementação. No entanto, as LCIs determinadas nas imagens não correspondem às linhas de preamar de sizígia (LPS). Assim, como solução para a transformação das medidas feitas das LCIs para LPS foi desenvolvido o modelo de Projeção de Maré. Este modelo foi implementado na linguagem Python, em um *script* denominado ANALICOS, que permite realizar a preparação dos dados, a estimação e a análise estatística da LC.

Com base na análise dos dados de entrada e após a realização dos experimentos, foi possível inferir que a metodologia utilizada neste trabalho para a extração da LC, utilizando o QGIS, foi suficiente para detectar as LCIs, considerando praias com grande amplitude de maré (meso e macromaré) e de baixa declividade, uma vez que neste trabalho a declividade média estimada foi 2,2%, enquanto a média global é de 10%. Os sinais de maré podem não ser uniformes para uma mesma faixa de areia, pois depende da declividade do perfil de praia, logo a técnica para a determinação desta declividade por amostras (utilizando transectos) foi um ponto importante deste trabalho.

Então, após a determinação desta declividade, para cada transecto, foi possível aplicar o modelo de Projeção da Maré (PM) para estimar a posição da linha de preamar de sizígia (LPS) e construí-la na forma de uma linha contínua (arquivo vetorial *shapefile*), visando a posterior comparação com dados de referência. Como referências foram utilizadas duas fontes: a LC extraída manualmente a partir de uma imagem do dia 27/08/2023 e a LC disponibilizada pela NOAA, e que está relacionada com uma LPS média.

Apesar dos resultados deste trabalho mostrarem que não foi possível atender aos critérios da OHI (OHI, 2020) para a incerteza no levantamento da linha de costa com 95% de confiança, o cálculo do PEC-PCD indica que é possível utilizar este produto em cartas nas escalas menores do que 1:100.000 (Classe A) e até mesmo 1:25.000 (Classe D). Isto pode representar até 70% das cartas náuticas brasileiras. Assim, das análises estatísticas e visuais dos dados, concluiu-se que a linha estimada pelo modelo proposto representa de forma suficiente a LPS, resguardada a acurácia que os produtos cartográficos exigem.

Portanto, este estudo alcançou os objetivos específicos de desenvolver um método para extração da LCI em imagens orbitais e desenvolver um modelo para estimativa da LPS, mesmo que não se tenha imagens observadas no período da maré de sizígia. No entanto, o objetivo específico de analisar o resultado com base em uma referência confiável foi atendido parcialmente, pois os produtos ficaram limitados à qualidade dos dados de entrada e de referência, como as imagens orbitais do Sentinel-2, as alturas de maré da RMPG e a LC da NOAA, não atendendo à totalidade dos produtos cartográficos náuticos.

Como sugestão para trabalhos futuros coloca-se: realizar a extração das LCIs a partir de imagens orbitais com maior resolução espacial; utilizar dados de referência de outras fontes e avaliar o método de Projeção de Maré para estas situações. Por fim, ressalta-se a necessidade da continuidade desse estudo para explorar a potencialidade deste tipo de técnica, avaliando novas aplicações, o atendimento aos critérios da OHI e, principalmente, definindo quais escalas cartográficas serão atendidas com este produto.

Referências

- ALBUQUERQUE, M. da G. *Morfodinâmica da Praia do Futuro, Fortaleza-CE*. 150 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) — Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2008.
- ALTINUC, S. O.; KEÇELI, A. S.; SEZER, E. A. Semi-automated shoreline extraction in satellite imagery and usage of fractals as performance evaluator. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, v. 6, p. 102–106, 2014.
- ARMAROLI, C. et al. An integrated study of shoreline variability using gis and argus techniques. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 473–478, 12 2006.
- BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, Coastal Education and Research Foundation, v. 2005, n. 214, p. 688 – 703, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.2112/03-0071.1>>.
- CARTWRIGHT, D. E.; TAYLER, R. J. New Computations of the Tide-generating Potential. *Geophysical Journal International*, v. 23, n. 1, p. 45–73, 06 1971. ISSN 0956-540X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb01803.x>>.
- CHANG, F.-J.; LAI, H.-C. Adaptive neuro-fuzzy inference system for the prediction of monthly shoreline changes in northeastern taiwan. *Ocean Engineering*, v. 84, p. 145–156, 2014. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801814001097>>.
- DHN. *CARTA 12000 (SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E TERMOS USADOS NAS CARTAS NÁUTICAS BRASILEIRAS)*. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-publicacoes/carta-12000-int-1>>.
- DOODSON, A.; WARBURG, H. *Admiralty Manual of Tides*. Taunton: H.M. Stationery Office, 1941.
- DSG. Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre. In: *ET-ADGV-Defesa F Ter*. Exército Brasileiro, 2016. p. 85. Disponível em: <https://bdgex.eb.mil.br/portal/media/adgv/ADGV_Defesa_FT_2016_2a_Edicao_2016.zip>.
- FRANCO, A. dos S. *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. 2º. ed. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2009. ISBN 978-85-7293-058-1.
- GILL, S.; SCHULTZ, J. *Tidal datums and their applications*. [S.l.]: NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1, Silver Spring MD, NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products and Service, 2001. 102 p.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital image processing*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008. ISBN 9780131687288 013168728X 9780135052679 013505267X.
- IBGE. *Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2011. ISBN 978-85-240-4219-5.

IHO. *S-32 IHO Hydrographic Dictionary*. 2019. Acesso em 15 de janeiro de 2022. Disponível em: <<http://iho-ohi.net/S32/>>.

KOMOLAFE, A. A. et al. Spatio-temporal analysis of shoreline positional change of ondo state coastline using remote sensing and gis: A case study of ilaje coastline at ondo state in nigeria. *Earth Systems and Environment*, v. 6, n. 1, p. 281–293, Jan 2022. ISSN 2509-9434. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00270-1>>.

KUMAR, L.; AFZAL, M. S.; AFZAL, M. M. Mapping shoreline change using machine learning: a case study from the eastern indian coast. *Acta Geophysica*, v. 68, n. 4, p. 1127–1143, Aug 2020. ISSN 1895-7455. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11600-020-00454-9>>.

KVALE, E. P. The origin of neap–spring tidal cycles. *Marine Geology*, v. 235, n. 1, p. 5–18, 2006. ISSN 0025-3227. Proceedings of the 6th International Congress on Tidal Sedimentology (Tidalites 2004). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322706002544>>.

LIMA, O. P. D. *Localização geodésica da linha da preamar média de 1831 – LPM/1831, com vistas à demarcação dos terrenos de marinha e seus acrescidos*. 270 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LIU, D.; YU, J. Otsu method and k-means. In: *2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 344–349.

LUIJENDIJK, A. et al. The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 6641, Apr 2018. ISSN 2045-2322. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>>.

MCALLISTER, E. et al. Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, v. 174, p. 104102, 2022. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383922000229>>.

MENTASCHI, L. et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 12876, Aug 2018. ISSN 2045-2322. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>>.

NIJAMIR, K. et al. Geoinformatics application for estimating and forecasting of periodic shoreline changes in the east coast of ampara district, sri lanka. *Ocean & Coastal Management*, v. 232, p. 106425, 2023. ISSN 0964-5691. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096456912200401X>>.

OHI. *S-44 - Standards for Hydrographic Surveys*. Monaco: International Hydrographic Organization, 2020. Disponível em: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf>.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. 1º. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2008. ISBN 9788522105953.

PEREIRA, L.; CONCEJO, A. V.; TRINDADE, W. 5 - tidal modulation. In: JACKSON, D. W.; SHORT, A. D. (Ed.). *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, 2020. p. 87–101. ISBN 978-0-08-102927-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081029275000059>>.

ROBERTSON, W. et al. Mapping Shoreline Position Using Airborne Laser Altimetry. *Journal of Coastal Research*, Coastal Education and Research Foundation, v. 20, n. 3, p. 884 – 892, 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20\[884:MSPUAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20[884:MSPUAL]2.0.CO;2)>.

SCARDINO, G. et al. Sea-level rise and shoreline changes along an open sandy coast: Case study of gulf of taranto, italy. *Water*, v. 12, p. 1414, 05 2020.

SHI, W.; CHEUNG, C. Performance evaluation of line simplification algorithms for vector generalization. *The Cartographic Journal*, Taylor & Francis, v. 43, n. 1, p. 27–44, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/000870406X93490>>.

SILVA, F. R. R. da. *Atualização de contornos em cartografia náutica baseada em imagens de vídeo e dados do sensor HRV-pancromático*. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SOK, K. et al. Seven decades of shoreline changes along a muddy mangrove coastline of the upper gulf of thailand. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 47, n. 6, p. 1425–1438, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.5324>>.

VOS, K. et al. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, v. 150, p. 160–174, 2019. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383918305313>>.

VOS, K. et al. Beach slopes from satellite-derived shorelines. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 14, p. e2020GL088365, 2020. E2020GL088365 2020GL088365. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL088365>>.

WESSEL, P.; SMITH, W. H. F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *J. Geophys*, v. 101(B4), p. 18741–8743, 1996. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JB00104>>.

ZEINALI, S.; DEHGHANI, M.; TALEBBEYDOKHTI, N. Artificial neural network for the prediction of shoreline changes in narrabeen, australia. *Applied Ocean Research*, v. 107, p. 102362, 2021. ISSN 0141-1187. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118720309214>>.